

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Marcelo R. Hernandez

..... E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 28 / 07 / 2011

Lucy Sant'Ana  
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Marcelo Rocha Hernandez**

## **Estudo dos componentes auxiliares de partida a frio de motores movidos a Diesel**

Campinas, 2011.

**Marcelo Rocha Hernandez**

# **Estudo dos componentes auxiliares de partida a frio de motores movidos a Diesel**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Área de Concentração: Eletrônica.

Orientador: Sérgio Santos Mühlen.

Campinas

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

H43e	<p>Hernandes, Marcelo Rocha Estudo dos componentes auxiliares de partida a frio de motores movidos a Diesel / Marcelo Rocha Hernandes. -- Campinas, SP: [s.n.], 2011.</p> <p>Orientador: Sérgio Santos Mühlen. Dissertação de Mestrado (Profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Motor Diesel. I. Mühlen, Sérgio Santos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
------	--

Título em inglês: Study of auxiliary components of cold start in Diesel engines.

Palavras-chave em inglês: Diesel engine, Cold regions.

Área de concentração: Eletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Waldyr Luiz Ribeiro Gallo, Carlos Alberto dos Reis Filho

Data da defesa: 28-07-2011

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**


**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL**

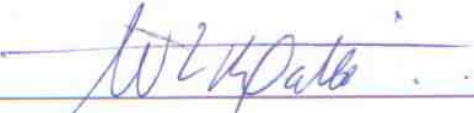
**Estudo dos componentes auxiliares de partida a  
frio de motores movidos a Diesel**


Autor: Marcelo Rocha Hernandez

Orientador: Sérgio Santos Mühlen

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Santos Mühlen  
FEEM/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo  
FEM/UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Alberto dos Reis Filho  
UFABC/Santo André

Campinas, 28 de Julho de 2011.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a Deus, autor e salvador da minha vida, à minha família, em especial à minha amada esposa Daniela e aos meus queridos filhos Bruno e Juan por toda a paciência, apoio, compreensão e amor incondicional, pelos períodos de ausência dedicados à conclusão deste trabalho e nos momentos mais difíceis que enfrentamos.

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A todos os Mestres e Doutores da UNICAMP e do ITA pela dedicação e presteza com que transmitiram os conhecimentos necessários para alcançar esta meta.

À MWM International pelo apoio e incentivo necessários para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos e companheiros de mestrado Anderson Almeida Carlos, Edmar Gosi de Camargo, Eduardo Torrigio, Marco Antônio Iskandar, Roberto Carlos de Castro Silva e Wagner de Camargo Orlof pela camaradagem e auxílio durante todo o decorrer do curso.

A todos os meus familiares e amigos pelos momentos de descontração durante os intervalos de dedicação ao trabalho, pelo apoio, incentivo e pelas orações, em especial minha esposa Daniela e filhos (Bruno e Juan), meus pais Elyseu e Josepha, minha irmã Miriam, sogros José Júlio e Elisete, cunhados Célio e Danusa, amigos Bruno Pinta, Edson e Rachel, Celso e Teresinha, Wendel e Lilian, Odair e Paula.

Aos Profs. Dr. Carlos Alberto dos Reis Filho e Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo pelas relevantes sugestões e direcionamentos feitos durante o Exame de Qualificação que enriqueceram o conteúdo deste trabalho.

Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Santos Mühlen pela paciência com que me conduziu durante o processo de elaboração deste trabalho e toda a sua competência.

*“Nem olhos viram, nem ouvidos ouviram,  
nem jamais penetrou o coração humano, o  
que Deus tem preparado para aqueles que  
O amam.”*

*Bíblia Sagrada*

## Resumo

A questão da partida a frio de motores movidos a Diesel ainda é um problema que não foi apropriadamente resolvido e se torna particularmente crítico em face da tendência de redução de níveis de emissões de poluentes a baixas temperaturas e da taxa de compressão do motor visando redução do consumo de combustível. Embora esteja claro que existem alguns fatores-chave que levam a um apropriado processo de partida a frio, sua relevância e relações não são claramente compreendidas. Assim, os esforços para a otimização do processo de partida a frio são principalmente baseados em procedimentos de tentativa e erro em câmaras climáticas a baixas temperaturas, com sérias limitações em termos de confiabilidade da medição em algumas condições, baixa repetibilidade e altos custos com experimentos.

O objetivo deste trabalho é estudar os componentes auxiliares de partida a frio dos motores a Diesel com o intuito de adquirir conhecimento sobre este tema para aplicação em propulsores, de maneira que estes possam ser utilizados em regiões com temperaturas negativas com desempenho confiável. Os componentes estudados serão apresentados, bem como sua aplicação e importância na tarefa de proporcionar as condições adequadas à partida a frio do motor. Além disso, uma visão geral será dada em relação à contribuição que estes componentes trazem na redução de emissões de poluentes e consumo de combustível.

*Palavras-chave:* Partida a frio, Componentes auxiliares, Motor Diesel.



## **Abstract**

Cold start in Diesel engines is a problem which has not yet been properly solved and becomes particularly critical with the current trend to reduce the emission levels at low temperatures and engine compression ratio addressed to fuel consumption decrease. Although it is clear that there are some key factors whose control leads to a proper cold start process, their individual relevance and relations are not clearly understood. Thereby, the efforts on optimization of the cold start process are mainly based on a trial-and-error procedure in climatic chambers at low ambient temperature, with serious limitations in terms of measurement reliability, low repeatability and high experiments costs.

The objective of this work is to study cold start auxiliary components of Diesel engines in order to acquire knowledge on this topic for application in engines in a way that they can be used in regions with low temperatures with reliable performance. The components studied will be presented, as well as its application and importance of providing appropriate conditions to engine cold start. In addition, an overview will be given on the contribution that these components are going to bring in the reduction of emissions and fuel consumption.

*Keywords:* Cold start, Auxiliary components, Diesel engine.

## Lista de Ilustrações

Figura 1 – A) Regiões do mundo consideradas “severamente frias”, e B) “moderadamente frias”. Linhas baseadas em Bates e Bilello (1966). Mapa-mundi do DI Cartography Center (1999). .....	1
Figura 2 – Esquemático de um motor de combustão interna.....	5
Figura 3 – Funcionamento do motor de combustão interna de 4 tempos. ....	6
Figura 4 – Fases da combustão em motores Diesel (Heywood, 1988).....	11
Figura 5 – As três fases da combustão do motor Diesel em relação a pressão no cilindro (adaptado de Nunney, 2006).....	12
Figura 6 – Resumo das etapas antes e depois da autoignição (Dieselnet, 2011).....	15
Figura 7 – Definição do atraso de ignição (Dieselnet, 2011). ....	18
Figura 8 – As três possíveis misturas para a combustão (Dieselnet, 2011).....	19
Figura 9 – Ciclo de direção FTP75 (Dieselnet, 2011). ....	25
Figura 10 – Ciclo de direção NEDC (Dieselnet, 2011). ....	26
Figura 11 – Ciclo de direção 10-15 Mode (Dieselnet, 2011). ....	27
Figura 12 – Ciclo curto de direção IULC (Dieselnet, 2011). ....	28
Figura 13 – Ciclo curto de direção IUFC (Dieselnet, 2011).....	28
Figura 14 – Ciclo curto de direção IRC (Dieselnet, 2011). ....	29
Figura 15 – Estrutura do material particulado (Heywood, 1988). ....	31
Figura 16 – Taxa de criação de moléculas de NO em função da temperatura para diferentes razões de equivalência (Heywood, 1988).....	34
Figura 17 – Redução da massa de NO em função da concentração de diversos gases na admissão (Heywood, 1988). ....	35
Figura 18 – Evolução das normas de emissões para veículos leves nos EUA (DEPS, 2008).....	37
Figura 19 – Evolução do controle de NOx e MP em veículos pesados nos EUA (DEPS, 2008). ....	38
Figura 20 – Ciclo de 13 pontos (ESC) (Dieselnet, 2011). ....	42

Figura 21 – Matérias-primas utilizadas nas regiões do Brasil (Suarez, 2009). ....	53
Figura 22 – Evolução dos efeitos do BioDiesel na emissão de poluentes em motores Diesel para veículos pesados (Labeckas e Slavinskis, 2006). ....	57
Figura 23 – Ponto de congelamento considerando um anticongelante da marca Havoline. ....	60
Figura 24 – Características de uma bateria de chumbo-ácido. Tensão de circuito aberto, gravidade específica, capacidade e ponto de congelamento usando eletrólitos de temperatura normal. Curvas relativas a 25 °C (Challen e Baranescu, 1999). ....	63
Figura 25 – Efeito da temperatura do ar de admissão e taxa de arranque ao final do estágio de compressão do motor Diesel. Claramente demonstra o valor do aumento da temperatura do ar de admissão (Diemand, 1991b). ....	79
Figura 26 – Perda de calor sob várias temperaturas na presença de vento (Diemand, 1991b). ....	81
Figura 27 – Efeito de um componente auxiliar de partida a frio no tempo de partida (Mann <i>et al.</i> , 1999). ....	83
Figura 28 – Curvas típicas de temperatura e corrente em função do tempo, de velas aquecedoras auto ajustáveis, a uma tensão de alimentação de 11 V (Lindl e Schmitz, 1999). ....	85
Figura 29 – Estrutura de uma vela aquecedora auto regulável de acionamento rápido (Beru). ....	85
Figura 30 – As três fases de trabalho da vela aquecedora (Beru). ....	86
Figura 31 – Vela aquecedora de elemento cerâmico comparada com vela aquecedora de elemento metálico (Kern <i>et al.</i> , 1999). ....	86
Figura 32 – Temperatura ao longo do tempo de um aquecedor e do ar de admissão de um aquecedor auto regulável em um motor de 6 litros (Lindl e Schmitz, 1999). ....	88
Figura 33 – Resultados de partida a frio a -20 °C utilizando (a) velas aquecedoras, (b) aquecedor do ar de admissão: velocidade instantânea (linha sólida), opacidade (linha pontilhada) (Payri <i>et al.</i> , 2006). ....	89
Figura 34 – Efeito do número de cetano na partida do motor: a) efeito na temperatura em que o motor partirá facilmente; b) efeito no tempo de partida em temperaturas entre -18 °C e 27 °C (Diemand, 1991a). ....	92
Figura 35 – CFPP para as diferentes misturas de BioDiesel (Randazzo, 2009). ....	95

Figura 36 – Tempos de partida a frio para as diferentes misturas de BioDiesel (Randazzo, 2009).	96
Figura 37 – Potência de aquecimento requerida para elevar a temperatura do líquido de arrefecimento no bloco para -1,1 °C em motores com os cilindros em linha (Diemand, 1991b).	98
Figura 38 – Efeito da temperatura na viscosidade de óleos mono-grau e multi-grau (Diemand, 1990).	100
Figura 39 – Potência requerida de um aquecedor para elevar o óleo no cárter a -1,1 °C (Diemand, 1991b).	101
Figura 40 – Curvas de aquecimento para diferentes tamanhos de aquecedores do líquido de arrefecimento e do óleo do cárter testados em motor isolado resfriado.	102
Figura 41 – Efeito da temperatura e estado de carga na gravidade específica do eletrólito da bateria e seu ponto de congelamento (Diemand, 1991c).	103
Figura 42 – Redução aparente de potência em uma bateria completamente carregada em baixas temperaturas (Diemand, 1991c).	104
Figura 43 – Desempenho de uma bateria de chumbo-ácido em várias temperaturas (Challen e Baranescu, 1999).	104
Figura 44 – Falha de partida com uso da bateria (Liu <i>et al.</i> , 2008).	106
Figura 45 – Partida bem sucedida através do um do sistema híbrido (Liu <i>et al.</i> , 2008).	106
Figura 46 – Instabilidade de combustão típica na partida a frio de um motor Diesel (Rakopoulos e Giakoumis, 2009).	108
Figura 47 – Mecanismos de falha de combustão durante a partida a frio do motor Diesel (adaptado de Rakopoulos e Giakoumis, 2009).	109
Figura 48 – Emissão veicular ao longo da viagem (André e Joumard, 2005).	111
Figura 49 – Estimativa de emissão de poluentes de forma desagregada (André e Joumard, 2005).	112
Figura 50 – Evolução das emissões de HC durante a fase UDC do ciclo de direção europeu (Payri <i>et al.</i> , 2006).	113
Figura 51 – Evolução das emissões de CO durante a fase UDC do ciclo de direção europeu (Payri <i>et al.</i> , 2006).	113

Figura 52 – Diferenças entre HC, CO, NOx e PM acumulados durante o ciclo MVEG (Payri <i>et al.</i> , 2006). .....	114
Figura 53 – Efeito do componente auxiliar de partida sobre a emissão de fumaça branca em motor de 4,45 l, 4 cilindros (Mann <i>et al.</i> , 1999). .....	115
Figura 54 – Fluxograma do método para determinação do adicional de emissões por partida a frio definido por Hansen (2008). .....	116
Figura 55 – Emissões em marcha lenta de carbono primário, carbono orgânico e carbono total (Dieselnet, 2011). .....	120

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Evolução das normas de emissões europeias para veículos comerciais leves (Dieselnet, 2011). .....	39
Tabela 2 – Evolução das normas de emissões europeias para veículos comerciais pesados (Dieselnet, 2011). .....	40
Tabela 3 – Ciclo ESC composto por 13 modos em função de rotação e carga respectivamente (CETESB, 2009). .....	43
Tabela 4 – Evolução das normas de emissões brasileiras para veículos comerciais pesados (CETESB, 2009). .....	44
Tabela 5 – Características do uso do BioDiesel em países da Europa (Suarez, 2009). .....	54
Tabela 6 – Pontos de congelamento e ebulição de uma solução anticongelante (SAE J814, 1999). .....	59
Tabela 7 – Características de troca de calor a 99°C (210°F) (SAE J814, 1999). .....	60
Tabela 8 – Potências recomendadas de aquecedores do bloco e do cárter para diferentes tamanhos de motor. ....	78
Tabela 9 – Aquecedores recomendados para motores Diesel em temperaturas entre -35 e - 50 °C. ....	78
Tabela 10 – Desempenho de partida do motor nos testes de partida a frio a -20 °C (Payri <i>et al.</i> , 2006). .....	90
Tabela 11 – Viscosidade de óleo lubrificante em temperaturas ambiente (adaptado de SAE). ....	99
Tabela 12 – Comparação entre uma bateria convencional e um sistema híbrido em testes de campo em veículo comercial (Liu <i>et al.</i> , 2008). .....	107

## SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Ilustrações	ix
Lista de Tabelas	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	4
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Motor de combustão interna	5
2.2 História e princípios básicos do motor Diesel	8
2.2.1 O processo de combustão	10
2.2.1.1 Câmara de combustão	20
2.3 Emissões	22
2.3.1 Formação de poluentes	29
2.3.1.1 Formação de Material Particulado – MP	30
2.3.1.1.1 Formação de Fumaça Branca e Preta	32
2.3.1.2 Formação de Óxidos de Nitrogênio – NO <sub>x</sub>	33
2.3.1.3 Formação de Monóxido de Carbono – CO	35
2.3.1.4 Formação de Hidrocarbonetos – HC	36
2.3.1.5 Normas de emissões de poluentes	36
2.3.2 Estimativas de emissões veiculares	44
2.4 Combustível	47
2.4.1 Propriedades físico-químicas dos combustíveis	48
2.4.2 BioDiesel	51
2.5 Óleo lubrificante	57
2.6 Líquido de Arrefecimento	58
2.7 Sistema de Partida	61

2.7.1 Motor de Partida	61
2.7.2 Bateria	62
<b>3 PARTIDA A FRIO</b>	<b>65</b>
3.1 Fatores que afetam a partida a frio	65
3.2 Pesquisas anteriores realizadas em partida a frio	71
3.3 Capacidade de partida a frio sem auxílio	74
3.4 Aquecedores do motor	76
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>80</b>
4.1 Introdução	80
4.2 Ar de admissão	82
4.2.1 Vela aquecedora	83
4.2.2 Aquecedor do ar de admissão	87
4.3 Combustível	90
4.3.1 Aquecedor do combustível	92
4.3.2 BioDiesel	93
4.4 Líquido de arrefecimento e bloco do motor	96
4.4.1 Aquecedor do líquido de arrefecimento e bloco do motor	97
4.5 Óleo lubrificante	98
4.5.1 Aquecedor do óleo lubrificante	100
4.6 Bateria	102
4.6.1 Aquecedor da bateria	105
4.6.2 Uso de supercapacitores	105
4.7 Instabilidade de combustão durante a partida a frio	107
4.8 Emissões	110
4.8.1 Determinação do adicional de emissões em partida a frio	116
4.8.2 Emissões a frio em marcha lenta	119
4.9 Consumo de combustível	121
4.10 O uso de novas tecnologias	122
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS</b>	<b>124</b>
Referências	128



# 1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo são apresentados os fatores que levaram ao desenvolvimento do presente trabalho, bem como seus objetivos.

## 1.1 Motivação

Cerca de metade da área geográfica da Terra é submetida a temperaturas médias abaixo de 0 °C durante o mês mais frio do ano. Deste montante, metade dela (toda a Sibéria, Groenlândia e Antártida; grande parte do Canadá e Alasca; partes da China e do norte da Europa) pode ser considerada “severamente fria”, pois a temperatura anual média do ar fica abaixo de 0 °C. A outra metade (incluindo a maior parte dos Estados Unidos e Eurásia) é considerada “moderadamente fria”, onde as temperaturas médias do ar durante o mês mais frio do ano são abaixo de 0 °C (Diemand e Lever, 2004). A Figura 1 apresenta a extensão das regiões frias conforme foram definidas.

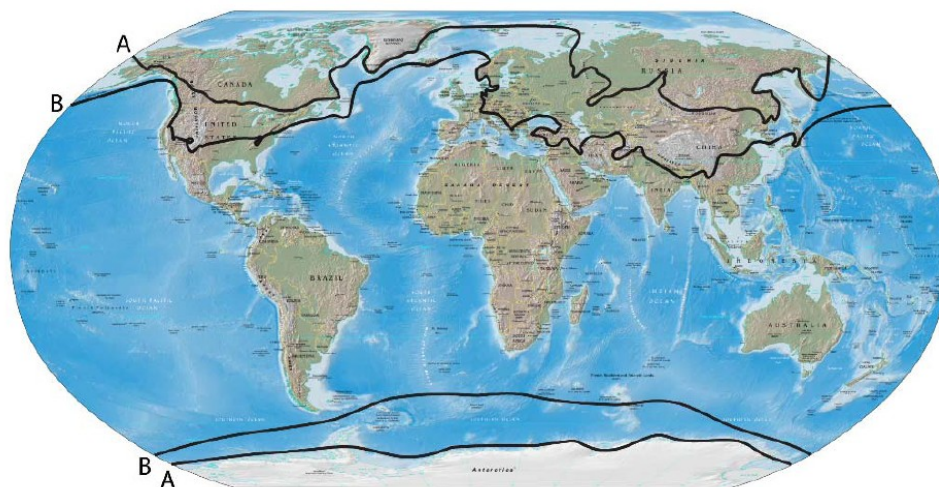


Figura 1 – A) Regiões do mundo consideradas “severamente frias”, e B) “moderadamente frias”.  
Linhas baseadas em Bates e Bilello (1966). Mapa-múndi do DI Cartography Center (1999).

Existem poucas áreas no mundo onde temperaturas extremamente baixas são comuns. Estas áreas são, por isso, pouco povoadas. Temperaturas prolongadas abaixo de  $-40^{\circ}\text{C}$  são comuns durante os meses de inverno nas regiões polares, na calota polar da Groenlândia, em regiões de altitude muito elevada, na parte central do Alasca, partes do norte do Canadá e centro-norte da Ásia.

O desempenho a frio dos motores a Diesel é um tema muito importante, em particular para estas áreas. Os proprietários de veículos esperam que seus motores dêem partida rapidamente e sem falhas sob quaisquer condições ambientais e que seja disponibilizada a potência necessária sem a ocorrência de ruído excessivo e de emissões excessivas de gases poluentes (Mann *et al.*, 1999).

Um requisito essencial de qualquer motor, seja ele um modelo novo ou antigo, é que possua um bom comportamento de partida a frio e que continue a rodar sem hesitação durante o período de aquecimento do motor. Um requisito adicional e mais atual é que o processo de partida a frio deve ser acompanhado de baixas emissões de poluentes na exaustão e menor consumo de combustível.

O desempenho dos motores é fortemente afetado pela temperatura ambiente, apresentando substancial aumento do tempo de partida do motor e até mesmo as emissões de gases quando a temperatura é reduzida a valores abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$ . Fabricantes que pretendem aplicar seus motores em ambientes de clima frio necessitam fazer uso de componentes auxiliares de partida para adaptar ou melhorar o desempenho de partida a frio.

Sendo assim, um melhor entendimento em relação a estes componentes de auxílio é essencial para que sejam corretamente aplicados e proporcionem as melhorias esperadas ao motor para sua partida a baixas temperaturas, bem como o uso racional da potência elétrica requerida por estes componentes por questões econômicas e ambientais.

A capacidade de partida a frio de um motor a Diesel pode ser definida como a habilidade do motor em realizar uma rápida partida com a mínima assistência, conseguir manter sua rotação constante e sem falhas durante a partida, ou seja, partir o motor na primeira tentativa (Li U, 2001). Além disto, outro problema encontrado é conseguir reduzir as emissões de hidrocarbonetos não queimados que surgem (na forma de fumaça branca expelida pelo motor)

durante o processo de partida a frio, pois são afetadas pelas diversas interações físicas e processos químicos dentro dos cilindros do motor que levam à auto-ignição e à combustão.

A questão da partida a frio de motores movidos a Diesel ainda é um problema que não foi apropriadamente resolvido e se torna particularmente crítico em face da tendência de redução de níveis de emissões de poluentes a baixas temperaturas e da taxa de compressão do motor visando redução do consumo de combustível. Embora esteja claro que existem alguns fatores chave que levam a um apropriado processo de partida a frio, sua relevância e relações não são claramente compreendidas. Assim, os esforços para a otimização do processo de partida a frio são principalmente baseados em procedimentos de tentativa e erro em câmaras climáticas a baixas temperaturas, com sérias limitações em termos de confiabilidade da medição em algumas condições, baixa repetibilidade e altos custos com experimentos. Novas abordagens destes complexos processos físicos têm demandado o uso de modelos físicos avançados em simulações computacionais (Pastor *et al.*, 2009).

Os motores a Diesel usam velocidades de arranque tipicamente de 100 a 300 rpm durante a partida com tempo máximo de arranque de 30 segundos a 1 minuto para evitar o superaquecimento do motor de partida. Temperaturas abaixo de 0 °C são consideradas limítrofes para a partida, e quanto mais baixas as temperaturas e dependendo das características e requisitos a serem obedecidos pelo motor, faz-se necessário utilizar componentes auxiliares de partida para permitir uma partida bem sucedida (Gonzalez *et al.*, 1991).

Para entender o impacto dos componentes auxiliares durante a partida a frio de um motor, é importante visualizar cada passo do processo de partida. A qualidade da partida é drasticamente afetada dependendo da diminuição da temperatura ambiente até o ponto em que a partida do motor não mais acontece.

A partida a frio e fase de aquecimento do motor dependem das características do motor tais como a cilindrada, taxa de compressão, capacidade da bateria e o estado de carga, motor de partida e sistema de injeção. As características do óleo lubrificante, combustível, sistema de ar e líquido de arrefecimento também influenciam a partida e o aquecimento.

Os motores a Diesel mais modernos apresentam notáveis melhorias no desempenho através da tecnologia de injeção direta de combustível e o aumento nas pressões de injeção. O controle eletrônico e a fase de aquecimento são essenciais para o bom comportamento de partida a frio dos

motores a Diesel, quando as condições de operação durante o processo de partida estão longe das nominais, e a sua aceitação no mercado (Lindl e Schmitz, 1999). Apesar destas melhorias, somente os componentes auxiliares de partida promovem uma partida confiável.

## **1.2 Objetivo**

Estudar os componentes auxiliares de partida a frio dos motores movido a Diesel com o intuito de adquirir conhecimento sobre este tema para aplicação em propulsores de maneira que estes possam ser utilizados em regiões com temperaturas baixas, apresentando um desempenho confiável ao condutor do veículo, uma vez que em climas frios o motor apresenta considerável aumento no tempo de partida. Os componentes estudados serão apresentados, bem como sua aplicação e importância na tarefa de proporcionar as condições adequadas à partida a frio do motor. Além disso, uma visão geral será dada em relação a contribuição que estes componentes trazem na redução de emissões de poluentes e consumo de combustível.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentado um histórico sobre o motor Diesel, os princípios básicos de sua operação, da formação de poluentes, e outras informações relevantes relacionadas a subsistemas do motor que possuem influencia no assunto pesquisado.

### 2.1 Motor de combustão interna

O motor é o componente que transforma a energia armazenada em movimento. Uma descrição esquemática de um motor de combustão interna pode ser vista na Figura 2.

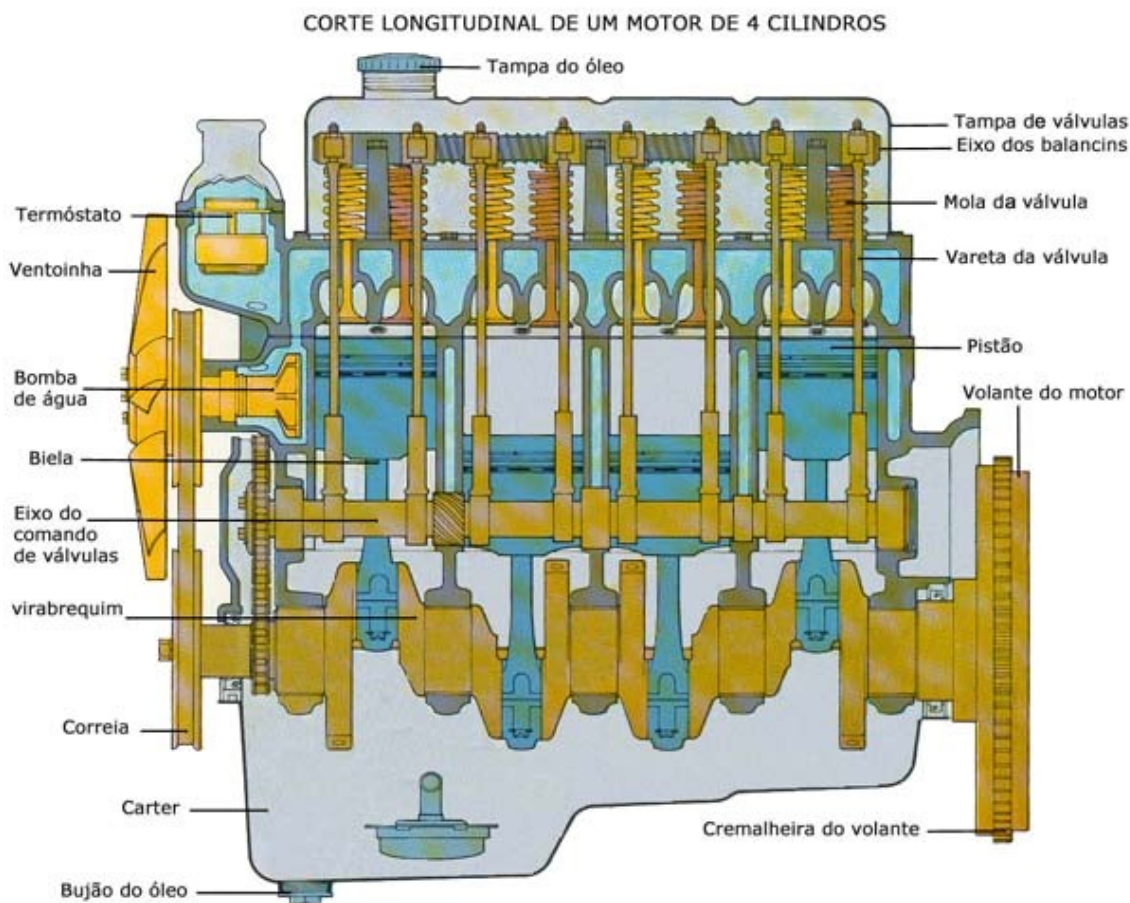


Figura 2 – Esquemático de um motor de combustão interna.

Os dois requisitos necessários para partir e operar motores de combustão interna são:

- a) Fornecer combustível e ar para os cilindros;
- b) Ignição da mistura ar-combustível.

O ciclo de trabalho de um motor de combustão interna aparece na Figura 3.

**Indução, admissão ou aspiração:** A válvula de admissão é aberta, o pistão excursiona para baixo do cilindro, realizando a carga de ar dentro do cilindro.

**Compressão:** Ambas as válvulas estão fechadas, e o pistão sobe pelo cilindro, comprimindo o ar aspirado de acordo com a respectiva taxa de compressão, aquecendo-o. Pouco antes do pistão atingir o ponto morto superior, o combustível é injetado sob alta pressão e a ignição ocorre.

**Expansão, combustão ou trabalho:** Transcorrido o atraso de ignição, o combustível pulverizado queima, por autoignição, a combustão se propaga pelo ar carregado no cilindro, aumentando a pressão e a temperatura e forçando o pistão para baixo; a energia de combustão é transformada em trabalho mecânico. No final do ciclo a válvula de escape abre.

**Exaustão, escape ou descarga:** A válvula de escape permanece aberta, e como o pistão excursiona até o topo do cilindro os gases restantes são expelidos. No próximo ciclo de trabalho novamente o ar será aspirado.

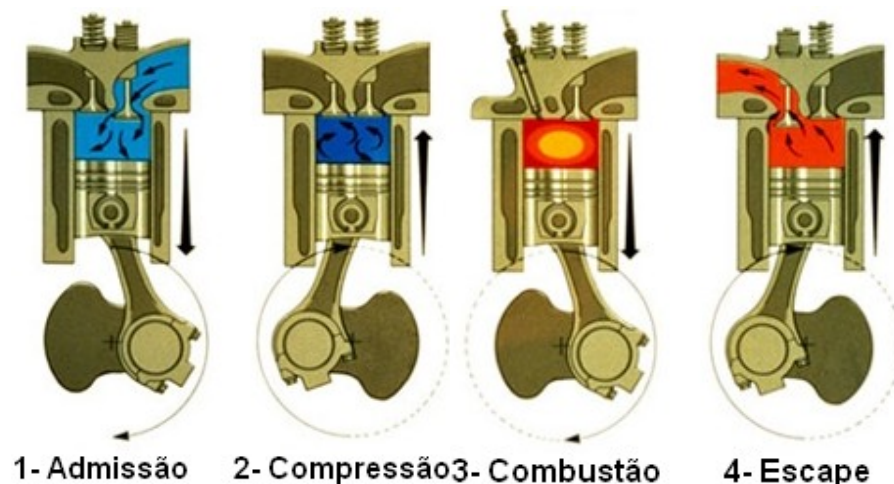


Figura 3 – Funcionamento do motor de combustão interna de 4 tempos.

Durante o período de queima do combustível ocorre um aumento abrupto da pressão acima do pistão. A rápida expansão dos gases de combustão empurra o pistão para baixo, fornecendo energia ao virabrequim. Ao fim do ciclo de expansão o pistão novamente sobe e com a válvula de escape aberta os gases da combustão são expelidos.

O processo de partida do motor de combustão possui dois estágios bem distintos. Um é quando o motor é comandado pelo motor de partida (chamado de arranque) e o outro quando o motor começa a rodar por si só, porém ainda não atingiu rotação de marcha lenta estável. Quando o motor de combustão atinge a velocidade de marcha lenta o processo de partida se encerra. O próximo processo é conhecido como fase de aquecimento do motor.

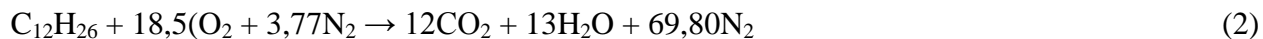
A combustão é uma sequência complexa de reações químicas exotérmicas entre um combustível e um agente oxidante. Em uma reação de combustão completa, um composto reage com o elemento de oxidação. Como exemplo, a reação de combustão do dodecano ( $C_{12}H_{26}$ ) é descrita pela Equação 1:



No caso dos motores de combustão interna, como na maioria das aplicações, o oxidante é o oxigênio presente no ar ambiente, introduzido no motor pelo sistema de admissão. Usualmente considera-se, numa aproximação suficientemente aceitável, o ar atmosférico composto de 21% de oxigênio ( $O_2$ ) e 79% de nitrogênio ( $N_2$ ).

A razão ar/combustível é uma relação das massas de ar e de combustível admitida pelo motor por ciclo. A relação inversa (razão combustível/ar) é um dos principais parâmetros de definição das condições de operação do motor:

Razão estequiométrica é a relação entre as massas de ar e de combustível que proporciona uma reação de combustão completa, ou seja, resulta unicamente dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor d'água ( $H_2O$ ) e nitrogênio ( $N_2$ ) como produtos da combustão. Como exemplo, a combustão estequiométrica do dodecano em ar atmosférico é descrita como:



Define-se fator Lambda da mistura ( $\lambda$ ) a relação entre a razão ar/combustível admitida pelo motor e a razão ar/combustível estequiométrica para o mesmo combustível. A Equação 3 apresenta a Equação para determinação de  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{(A/C)}{(A/C)_s} \quad (3)$$

## 2.2 História e princípios básicos do motor Diesel

O motor do ciclo Diesel foi desenvolvido pelo engenheiro alemão Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913), conhecido por ser o primeiro inventor a ter utilizado os princípios da termodinâmica antes da realização dos trabalhos experimentais para obter um novo conceito de motor. Sua patente foi obtida em 1892 com o objetivo de criar um motor que fosse mais eficiente que os demais motores da época (utilizasse menor quantidade de combustível para gerar o mesmo trabalho que os outros). O conceito de iniciar a combustão através da injeção de um combustível líquido, em uma câmara com ar aquecido através do processo de compressão, permitiu que o novo motor atingisse uma eficiência duas vezes maior que a dos motores da época (Heywood, 1988).

Seu primeiro protótipo rodou por aproximadamente 1 minuto a 88 rpm produzindo 13,2 hp. Foi fabricado em fevereiro de 1894 em Ausburg na Alemanha, mas foi em 1895 que ele produziu o primeiro motor operacional que gerava 20 hp a 165 rpm. A produção comercial dos motores Diesel só foi iniciada em 1898 para a geração de energia em aplicações industriais. A primeira aplicação veicular foi feita em 1929 nos EUA por Clessie Cummins, seguido pela Mercedes-Benz sete anos mais tarde na Europa.

O motor Diesel é o escolhido para aplicações pesadas na agricultura, construção civil, indústria e transporte rodoviário há mais de 50 anos. Sua popularidade poderia ser atribuída também à capacidade de usar a porção do petróleo cru que era anteriormente considerado como produto da sobra do refino da gasolina. Mais tarde, a durabilidade do motor Diesel, sua alta capacidade de torque e eficiência energética garantiram sua aplicação em aplicações de maiores demandas. Este poderoso propulsor é atualmente uma das mais importantes ferramentas



utilizadas no dia a dia da sociedade moderna. Por ser robusto, durável e econômico, o motor Diesel é utilizado em grande parte dos transportes marítimos e terrestres, e também é responsável por gerar energia elétrica para fazendas, construções e atividades industriais (Lloyd e Cackette, 2001).

O motor Diesel é um motor de ignição por compressão: as altas pressão e temperatura resultantes da compressão são suficientes para causar a ignição espontânea do combustível. Ele difere dos motores movidos à gasolina (ciclo Otto) que necessitam de uma centelha para causar a ignição do combustível, uma vez que a temperatura decorrente da menor taxa de compressão é inferior à do motor Diesel.

A taxa de compressão varia entre 15:1 e 22:1, resultando em altas pressões. A taxa de compressão real definida para um motor Diesel é influenciada pela qualidade do combustível e o desenho da câmara de combustão, que deve ser dimensionada para que se obtenha uma partida a frio confiável. A alta compressão aquece o ar acima de 350 °C e quando o pistão estiver próximo do fim do curso de compressão o combustível é injetado diretamente sobre o ar comprimido e aquecido na câmara de combustão. Se a temperatura da mistura ar-combustível no cilindro estiver acima do limite de autoignição a mistura começará a queimar. A geometria apropriada do injetor de combustível e a alta pressão de injeção garantem que o combustível seja pulverizado em pequenas gotículas e distribuído de maneira uniforme dentro da câmara de combustão. O formato da câmara de combustão, o número de furos do injetor e o perfil do jato são características do projeto do motor que influenciam na mistura do combustível com o ar. A cinética da admissão do ar também pode ser manipulada de forma que o ar permaneça dentro da câmara de combustão em movimento, circular ou ascendente, favorecendo a mistura e vaporização do combustível.

A alta temperatura no interior do cilindro vaporiza o combustível injetado que é então incendiado e as gotas continuam a vaporizar e a queimar até que a massa de combustível ou de ar se esgote e a queima se encerre. Do início da vaporização até o início da combustão existe um atraso que varia conforme a dinâmica da mistura e vaporização do combustível, assim como depende da temperatura de operação, da pressão do ar e das características do sistema de admissão e escape, o que torna o controle da combustão em um motor Diesel complexo e altamente dependente das condições de operação do motor e do controle do sistema de ar.

### **2.2.1 O processo de combustão**

No motor Diesel o combustível é injetado no cilindro com ar a pressão e temperatura previamente elevadas, e ocorre a autoignição de porções da mistura resultante da injeção e da vaporização do combustível no ar quente. Segue-se um processo de combustão que se expande rapidamente ao longo da câmara de combustão.

Turns (1996) define que a combustão pode ocorrer com ou sem a presença de frente de chama. A frente de chama é uma fina zona de intensa reação química que divide a câmara de combustão em gases já queimados e mistura por queimar. Existindo a frente de chama, podem-se reconhecer as categorias de chama em pré-mistura e de chama difusa. Estas duas categorias estão relacionadas ao estado de miscibilidade dos reagentes, como sugerido pelas suas designações. Numa combustão em pré-mistura, o combustível e o oxidante são misturados em nível molecular, antes do início da ocorrência de qualquer reação química significativa. O motor de ignição por centelha é o exemplo característico de ocorrência da combustão em pré-mistura.

O motor Diesel é caracterizado pela existência da chama difusa, porque os reagentes estão inicialmente separados, com a mistura e as reações químicas ocorrendo somente na interface entre o combustível e o ar. Na prática, nos motores Diesel os dois tipos de chama podem ocorrer em diferentes graus, apresentando quantidades significativas de chama em pré-mistura e chama difusa.

Guibet (1999) explica que nos motores Diesel o combustível é dosado pela bomba e injetado a alta pressão na câmara de combustão e sob a forma de um jato pulverizado, que vaporiza e se mistura com o ar. A combustão por autoignição ocorre em um ou em diversos pontos da câmara onde as condições de temperatura, pressão e dosagem de mistura são suficientes para iniciar uma reação química. A pressão aumenta rapidamente e resulta no ruído característico da combustão dos motores Diesel, cuja progressão passa a ser controlada somente pela variação da quantidade de combustível que está sendo injetado.

A chama da combustão é identificada como difusa, pois a mistura se forma enquanto a combustão ocorre por autoignição, resultando num gradiente de elevação de pressão na câmara de combustão. É prática preferencial que o combustível não seja injetado sobre as paredes da câmara de combustão, para garantir facilidade de mistura com o ar.

A duração do tempo de combustão deve ser controlada de forma precisa, para produzirem-se baixos níveis de emissões tóxicas e otimização da utilização do combustível, sendo a duração a soma do tempo de combustão e da injeção, acrescido de um curto período entre o início da injeção e a autoignição, chamado de atraso de ignição.

Com a autoignição, o combustível que foi acumulado durante o atraso queima-se rapidamente, num período chamado de combustão em pré-mistura e, enquanto ocorre o consumo da mistura preparada durante o atraso, o combustível restante queimará a uma taxa determinada pela relação de mistura dosada, numa fase que é conhecida como combustão em mistura controlada (van Gerpen, 2006).

A combustão no motor Diesel é complexa e inclui fenômenos físicos e químicos que foram descritos por muitos pesquisadores (Dec, 1997; Flynn *et al.*, 1999; Heywood, 1988). O processo de combustão é geralmente descrito em três fases distintas (Figura 4):

- a) Atraso de ignição (a  $\rightarrow$  b)
- b) Combustão em pré-mistura (b  $\rightarrow$  c)
- c) Combustão em mistura controlada (c  $\rightarrow$  d)

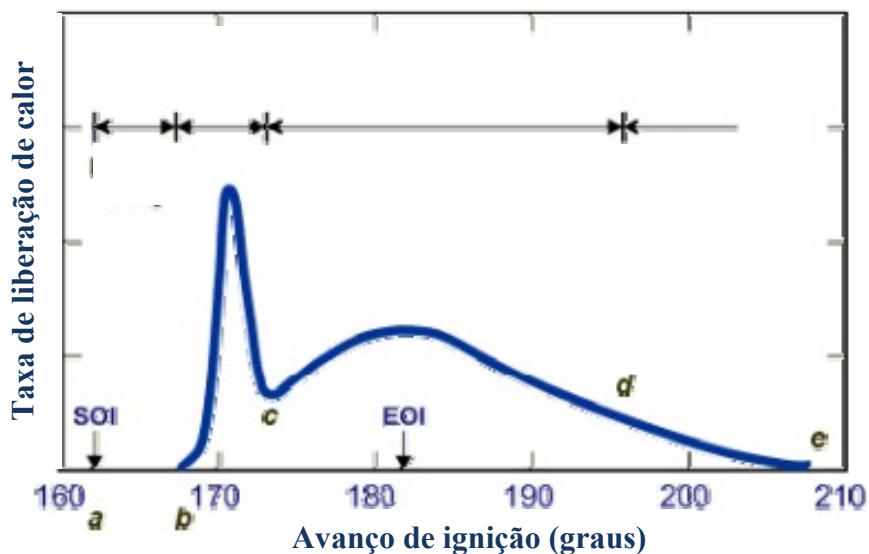


Figura 4 – Fases da combustão em motores Diesel (Heywood, 1988).

As três fases da combustão do motor Diesel também podem ser visualizadas em seus pontos de transição no gráfico da Figura 5, agora em relação a pressão no cilindro.

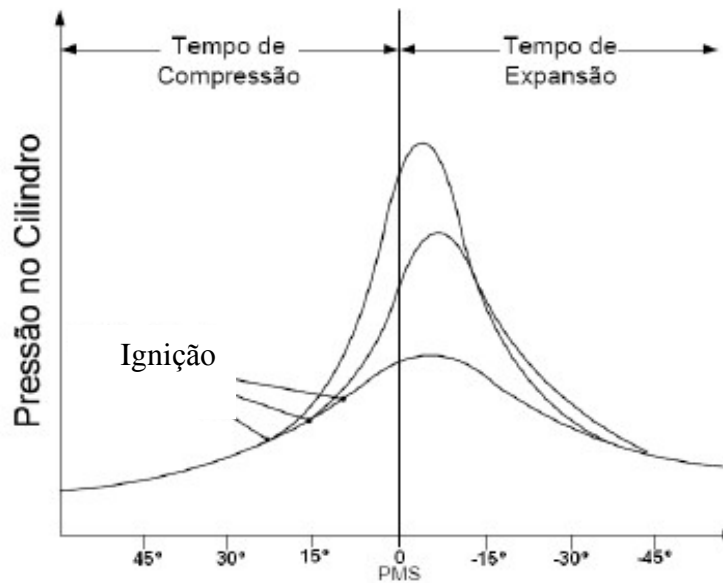


Figura 5 – As três fases da combustão do motor Diesel em relação a pressão no cilindro (adaptado de Nunney, 2006).

No motor Diesel o ar atmosférico é comprimido e sua temperatura eleva-se significativamente (Obert, 1971). Quando um ou mais jatos de combustível são introduzidos na câmara de combustão, eles se desintegram em um núcleo de combustível cercado por um envelope vaporizado de ar e combustível. Este envelope é criado tanto pela pulverização do combustível como pela turbulência do ar que passa através do jato e desnuda as partículas de combustível do seu núcleo.

A mistura no motor Diesel não é homogênea como num motor de ignição por centelha: após a injeção, existem na câmara de combustão algumas regiões onde podem ser identificadas gotículas isoladas de combustível, outras apenas com vapor de combustível, apenas ar comprimido ou misturas de ar e combustível vaporizado. Nos motores Diesel a relação de mistura varia desde o ar puro na periferia da pulverização até o combustível puro no núcleo do jato. Como a combustão é heterogênea, ela ocorre em uma faixa relativamente estreita de mistura. Nos processos heterogêneos, a formação de mistura é decisiva para determinar a qualidade da combustão que se seguirá à injeção (Bosch, 2005). Por consequência, a mistura definirá a eficiência com a qual o ar de combustão admitido será utilizado e determinará os níveis de pressão média efetiva.

As massas necessárias para gerar tais misturas devem ser eficientemente transportadas através da câmara. A eficiência deste transporte repousa na difusão do combustível e na turbulência do ar no interior do cilindro. Quando a ignição se dá em regiões que contenham misturas de combustível e ar apropriadas, a chama só se propagará se estas regiões de mistura forem contínuas. Regiões adjacentes, à beira da autoignição, podem queimar pela ação do calor transferido das regiões queimadas. É muito difícil, entretanto, fazer distinção entre uma propagação de chama e um processo de autoignição, que é auxiliado pelas altas temperaturas que estão sendo geradas na câmara durante a queima.

O grau de mistura de combustível e ar depende da pulverização do líquido e da movimentação do ar na câmara (Giacosa, 1964). A injeção do combustível inicia antes que o pistão atinja o ponto morto superior (PMS) e se prolonga num curto intervalo de tempo, durante o qual o virabrequim percorre um arco de círculo de até 35 graus. A duração do tempo de injeção depende da rotação utilizada e da cilindrada do motor. À medida que as partículas de combustível penetram na câmara de combustão, misturam-se com o ar de uma forma não totalmente homogênea, podendo variar muito de uma região para outra.

Como o ar comprimido encontra-se a uma temperatura superior à de ignição do combustível, a combustão pode se iniciar em qualquer ponto da câmara em que existam condições de queima ou simultaneamente em diversos pontos. Um sistema injetor eficaz deve dosar, para cada cilindro e em cada ciclo, a quantidade exata de combustível necessária ao atendimento das condições de carga e rotação do motor. No instante exato deve dividir o combustível em gotículas uniformes para produzir uma boa pulverização, facilitando assim o processo de combustão.

As gotículas de combustível devem ter energia cinética suficiente para penetrar na massa de ar comprimido e dispersar-se, uniformemente, de forma que cada uma delas tenha possibilidade de reagir com o oxigênio do ar de combustão. Tal possibilidade está relacionada ao alcance do jato atomizado e à difusão do combustível na massa de ar comprimido.

A eficiência da combustão e, portanto, o rendimento do motor Diesel, depende da qualidade da mistura formada por ar e combustível (Desantes *et al.*, 2005). Em sistemas de combustão convencionais, onde o combustível é injetado diretamente no ar, é necessário providenciar condições adequadas para uma boa macroestrutura da mistura na câmara de combustão. Para isso

o combustível deve ser uniformemente distribuído na câmara no intervalo de tempo disponível para formação da mistura, ou seja, num intervalo de tempo muito curto. O processo de mistura é fortemente influenciado pelo comportamento do jato de combustível emergente do injetor que, por sua vez, depende de diversos parâmetros relacionados ao sistema de injeção utilizado e com o ambiente no qual o jato de combustível é injetado, além das propriedades físico-químicas do combustível utilizado.

O ruído característico do motor Diesel é associado a esta fase (batida) (Heywood, 1988). A taxa de liberação de calor durante esta fase é limitada pela taxa de reações químicas e quantidade de combustível disponível durante a fase anterior de retardo na ignição. O aumento de pressão no cilindro nada mais é que a pressão de combustão dentro do cilindro, quanto mais alto o seu valor, maior a influência negativa nas solicitações e tensões mecânicas dos componentes do motor e no nível de ruído emitido pelo motor.

Ao tempo transcorrido entre o início da injeção e o instante em que se atingem condições de haver uma reação química (início da combustão detectável), dá-se o nome de atraso ou retardo físico da combustão. Durante esse período de atraso, o combustível é atomizado, vaporizado, misturado com o ar e tem a sua temperatura elevada. No período seguinte, chamado de atraso ou retardo químico, uma reação inicia lentamente e depois se acelera até o instante em que se dá a autoignição. Em algum ponto do envelope vaporizado formar-se-á uma mistura de ar e combustível passível de queima, tornando a oxidação iminente. O termo atraso de ignição é consignado ao tempo consumido pelos atrasos físico e químico. Para combustíveis mais leves, o atraso físico é pequeno e, para os mais viscosos, o atraso físico pode ser o fator limitante e controlador da combustão.

A duração do atraso de ignição é um importante parâmetro. Ele tem um significativo impacto no processo de combustão, nos esforços mecânicos, no ruído do motor e na emissão de gases. A Figura 6 apresenta um diagrama resumindo as etapas físicas e químicas antes e após a autoignição.

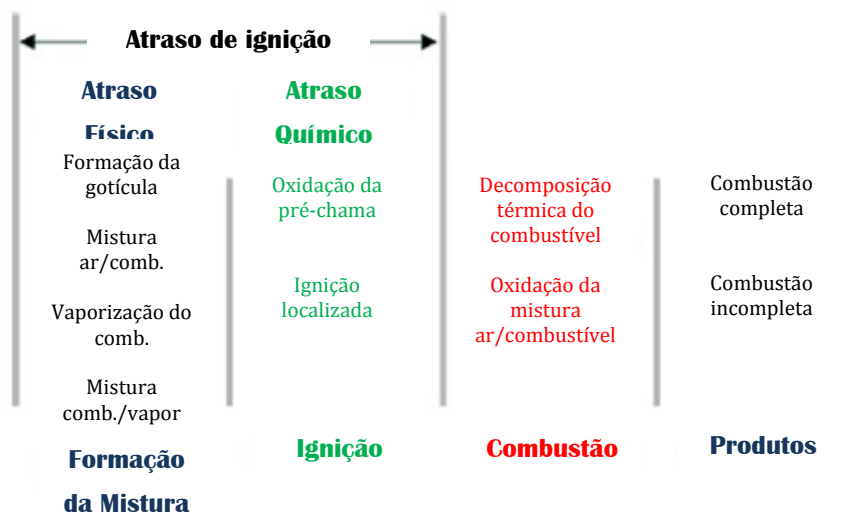


Figura 6 – Resumo das etapas antes e depois da autoignição (Dieselnet, 2011).

Os processos físicos envolvidos no período de atraso de ignição são:

- formação da gota;
- mistura do ar e combustível;
- aquecimento do combustível líquido e vaporização;
- mistura do vapor e do ar para formar uma mistura inflamável.

Estes passos se referem à preparação da mistura, embora esta etapa inclua também o efeito da agitação do ar devido ao projeto do canal de admissão, a transferência de calor do fluxo de ar pelo canal de admissão, a temperatura do ar e outros parâmetros que devem afetar a qualidade da mistura ar-combustível. A maioria, se não todos, destes passos são físicos por natureza e geralmente completados em um período de tempo extremamente curto.

O atraso físico pode ser significativamente reduzido através do uso de elevadas pressões de injeção e pela turbulência do ar no interior do motor, pois essas facilitam a desintegração do jato de combustível. Em algum ponto da câmara de combustão, ou em vários pontos ao mesmo tempo, surge uma chama sem uma propagação ordenada e sem frente de chama definida e áreas inteiras podem explodir ou queimar devido ao acúmulo de combustível na câmara durante o período de retardo da combustão (Obert, 1971).

Os processos químicos que ocorrem no período de atraso de ignição são:

- reações de pré-ignição que decompõem o hidrocarboneto e gera os radicais;
- ignição localizada que ocorre em diversas áreas dentro da câmara de combustão.

Estes processos se iniciam após o vapor de combustível ter contato com o ar, em estágios preliminares da injeção da massa de vapor de combustível que proporciona a reação química que é muito pequena para causar a detecção do fenômeno de combustão. Os estágios preliminares da pré-ignição podem ser considerados controlados pelos processos físicos que resultam na formação de uma mistura inflamável e nos estágios seguintes, pelas mudanças químicas que levam à autoignição (Henein e Patterson, 1972).

Em um motor Diesel o combustível não queima imediatamente após ser injetado no cilindro e sim depois de um brevíssimo intervalo de tempo (Giacosa, 1964). Durante este período, cada gota de combustível sofre transformações que tornam possível o início da combustão propriamente dita, sem que a pressão no cilindro aumente mais do que aumentaria sem combustão. Durante o tempo de retardo da combustão, pode-se distinguir uma fase na qual o combustível entra no cilindro, vaporiza e se mistura com o ar aquecido e uma segunda fase, muito mais extensa que a primeira, quando se desenvolvem ações intermoleculares que preparam a mistura para a ignição. O retardo de combustão é muito importante em motores de ignição por compressão. Ele influi sobre o modo que se realizará a combustão, a partida do motor e a produção dos gases de escape. Dentre as variáveis que influem sobre o retardo da combustão e sobre o trabalho que será produzido pelo motor, além do número de cetano (NC) do combustível, devem ser citados o efeito da pulverização, o alcance do jato combustível, a turbulência do ar, a taxa de compressão e as temperaturas do ar e do fluido de arrefecimento.

O número de cetano de um combustível é comumente utilizado para quantificar as características de atraso de ignição desse combustível. Combustíveis com baixo número de cetano têm maior atraso de ignição e mais combustível é injetado antes da ignição ocorrer. Isto produz maior pré-queima e rápidas taxas de queima quando a combustão se inicia, com altas taxas de elevação de pressão e altos picos de pressão. Maiores números de cetano têm menor atraso de ignição e a ignição ocorre antes da maior parte do combustível ser injetada. As taxas de calor liberado e aumento de pressão são então controlados pela razão de injeção e pela mistura ar-combustível, resultando numa operação mais suave do motor.

As condições ideais de pulverização, que devem ser buscadas, são as de mínimo diâmetro das gotas, para melhorar a combustão localizada e facilitar a partida, e o máximo número possível das gotas de diâmetro mínimo para possibilitar a uniformização da mistura e regularizar a



combustão. A penetração do jato de combustível na câmara deve estar em equilíbrio com a pulverização porque, se a última for excessiva, pode reduzir o alcance do jato e provocar uma má distribuição do combustível na massa de ar.

O aumento da taxa de compressão reduz o atraso de ignição, pois resulta no aumento da densidade do ar comprimido, baixando a temperatura mínima de autoignição devido ao contato mais direto que ocorre entre as moléculas, acelerando a reação de combustão. Se a temperatura do ar de admissão aumenta, aumenta também a do ar comprimido e o retardo de ignição decresce. Com o aumento da temperatura do fluido de arrefecimento, o retardo de ignição diminui devido à redução do calor removido do ar através das paredes da câmara de combustão. Isso, portanto, resulta na elevação da temperatura final do ar comprimido.

Durante o atraso de ignição alguns processos químicos e físicos tomam lugar antes que frações significativas do conteúdo energético do combustível sejam liberadas (Heywood, 1988). Os processos físicos incluem a pulverização do combustível líquido, a vaporização das gotas e a mistura deste vapor com o ar aquecido que se encontra no cilindro. Os processos químicos são as reações de pré-combustão entre o vapor de combustível, o ar comprimido e os gases residuais misturados, e que conduzem à condição de autoignição. Tais processos são afetados pelo projeto do motor, variáveis de operação e características do combustível.

Apesar de ser difícil desenhar uma linha que separe os processos físicos e químicos porque eles se sobrepõem, uma estimativa pode ser feita do ponto em que o processo químico começa a dominar. A Figura 7 decompõe o período de atraso de ignição em dois períodos quantificáveis. O período  $\tau_1$  representa o período antes da reação exotérmica que tem um efeito mensurável na pressão do cilindro. O período  $\tau_2$  representa a parte em que a reação exotérmica predomina, e restabelece a pressão do cilindro do calor absorvido pelo combustível evaporado. A combinação destes períodos representa o período de atraso de ignição (Kobori *et al.*, 2000).

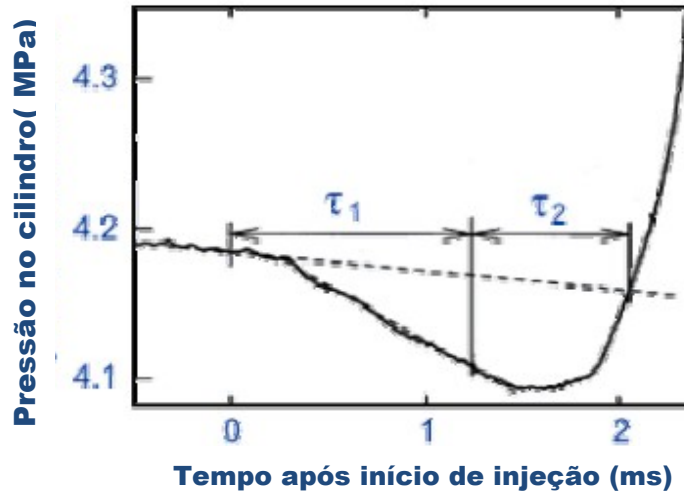


Figura 7 – Definição do atraso de ignição (Dieselnet, 2011).

O atraso de ignição é expresso como uma equação de Arrhenius na forma:

$$\tau_{id} = Ap^{-n} \exp\left(\frac{E_A}{RT}\right) \quad (4)$$

onde  $\tau_{id}$  é o tempo de atraso de ignição (normalmente expresso em ms),  $A$  e  $n$  são constantes,  $E_A$  é a energia aparente de ativação para o processo de autoignição,  $T$  é a temperatura absoluta da mistura ar-combustível e  $R$  é a constante universal dos gases. Valores para a Equação 4 podem ser encontrados na literatura (Assanis *et al.*, 2003; Heywood, 1988).

O controle e a progressão da combustão dos motores Diesel são extremamente complexos devido à mistura de ar e combustível ser heterogênea, por não existir propagação, e sim difusão da chama, e ainda por diversos parâmetros aerodinâmicos ligados ao projeto da câmara de combustão (Guibet, 1999). A combustão num motor Diesel é um processo físico-químico que se inicia com a injeção do combustível e que se encerra na exaustão dos gases queimados. A razão para esta complexidade do processo é que a combustão é influenciada por fatores como o tempo e pressão de injeção, dinâmica de formação da mistura, temperatura do ar e do combustível, entre outros. A própria vaporização do combustível é um processo complexo devido à variedade de compostos presentes.

Bosch (2005) definindo os principais parâmetros que influenciam de forma expressiva o processo de combustão dos motores Diesel citou que a energia cinética da pulverização varia em função da diferença de pressão existente nos orifícios do injetor, da geometria do bico injetor e da velocidade de saída do combustível. A liberação de calor em um motor Diesel depende da forma com que se dá o próprio processo de combustão, e é particularmente influenciado pelo início da injeção, taxa de injeção e pressão máxima utilizada. Nos motores de injeção direta, o número de orifícios do injetor é um fator crucial.

A combustão gera três tipos de misturas – rica, estequiométrica e pobre – que são apresentadas na Figura 8 (van Gerpen, 2001). Para a razão estequiométrica, a combustão é completa e ela produz geralmente apenas água e dióxido de carbono. Para misturas ricas existem duas possibilidades. Se a mistura permanece rica, a combustão será incompleta e produzirá fuligem. A segunda opção é encontrar uma mistura pobre ou ar suplementar que ao misturar-se formará uma mistura estequiométrica para produzir uma queima completa.

O terceiro tipo de mistura inicia-se pobre. Esta mistura também tem dois caminhos potenciais. Se ela misturar-se com uma mistura pobre ou somente com ar, não se queimará efetivamente e produzirá hidrocarbonetos não queimados mais precisamente na fase gasosa. Porém, se a mistura pobre encontrar uma mistura rica ou mais combustível e atingir uma condição estequiométrica, ela queimará completamente.

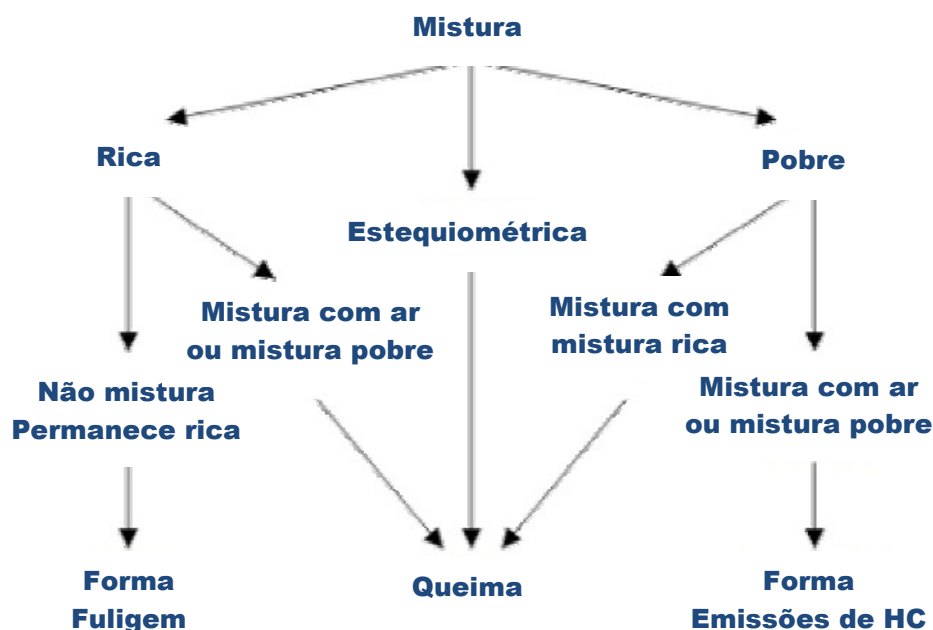


Figura 8 – As três possíveis misturas para a combustão (Dieselnet, 2011).

Uma quarta fase também pode ser definida, que descreve a atividade nos estágios finais após o final da injeção e a abertura da válvula de escape. Nesta fase final qualquer combustível restante que não foi consumido continuara a queimar, possivelmente em uma razão muito menor como mostrado na Figura 4 (d  $\rightarrow$  e). As condições nesta fase não são uniformes em termos de distribuição de temperatura e do ponto de vista químico.

Giacosa (1964) explica que durante o atraso de ignição das primeiras partículas de combustível injetado, também penetram na câmara de combustão outras partículas. Se o atraso de ignição é curto, característico de combustíveis com alto NC, as primeiras gotículas começam a se queimar imediatamente após um curto período de tempo e a quantidade de combustível que entra na câmara, nesse tempo, é pequena.

Quando se inicia a combustão, a taxa de variação da pressão não é elevada em demasia e a ação sobre o pistão se dá de uma forma gradual. Se o atraso de ignição é maior, característico de combustíveis de baixo NC, uma quantidade maior de combustível se acumula na câmara e, quando queimada, produz um forte gradiente de pressão e um funcionamento mais rude do motor.

Quando o retardo de combustão é demasiado, pode ocorrer um acúmulo exagerado de combustível no cilindro, resultando num aumento de pressão quase instantâneo e com violentas variações de pressão e vibrações na massa de gás, próprias de uma detonação, e que são chamadas de batida. O fenômeno é análogo ao dos motores de ignição por centelha. Nestes, porém, a detonação ocorre no final da combustão e nos motores Diesel ocorre no início.

A batida no motor Diesel é caracterizada pela autoignição súbita da mistura no início do processo de combustão, apesar de ser heterogênea e de se identificar a autoignição contínua em cada estágio do processo. A batida em um motor Diesel pode ser minimizada pelo uso de altas taxas de compressão, gerando altas temperaturas e pressões durante o segundo curso que reduzem o retardo da combustão, e evitando-se a injeção de grandes quantidades de Diesel muito rapidamente.

#### **2.2.1.1 Câmara de combustão**

##### **Câmara de combustão de injeção direta**

Nos motores Diesel de injeção direta, o combustível é pulverizado pelos diversos furos do injetor em um câmara de combustão aberta. A câmara de combustão de injeção direta oferece a vantagem de uma partida mais fácil e alta eficiência térmica com baixo consumo de combustível. Estas vantagens vêm de um espaço de combustão compacto que reduz a perda de calor e também minimiza a perda de potência.

Uma desvantagem é que o processo de combustão não é muito rápido, devido à longa distancia que o *spray* de combustível tem que penetrar no cilindro. Por esta razão faz-se necessárias altas pressões de injeção. Além disso, a disposição centralizada do injetor tende a impor restrições físicas ao tamanho das válvulas de admissão e de escape, prejudicando a eficiência volumétrica.

Os motores de câmara aberta são normalmente encontrados em motores de caminhões pesados, que têm projeto mais simples, sem pré-câmara de combustão.

### **Câmara de combustão de injeção indireta**

Para motores Diesel de injeção indireta o combustível é pulverizado por um injetor com furo único em uma câmara de combustão dividida, formada parcialmente no cabeçote e parcialmente por uma depressão no topo do pistão.

Neste tipo de câmara de combustão, o motor opera de forma mais suave e menos barulhenta. Isto pode ser explicado de forma simplificada devido ao processo de combustão ser iniciado confinado em uma pré-câmara e então o índice de elevação da pressão no cilindro é reduzido. A estrutura do motor não é tão forçada como ocorre no processo de injeção direta. Câmaras divididas são usualmente aplicadas no projeto de motores Diesel para veículos de pequeno porte.

Para produzir o adequado aquecimento para a autoignição do combustível num motor de injeção indireta é necessária maior taxa de compressão, geralmente da ordem de 20:1, principalmente para tentar compensar a perda de calor no cilindro. Além disso, motores de injeção indireta são mais difíceis de partir a frio, sendo necessária a aplicação de uma vela aquecedora na pré-câmara para inflamar o combustível.

O uso de maiores taxas de compressão naturalmente demanda uma bateria de maior capacidade e uma instalação especial do motor de partida.

## **2.3 Emissões**

As primeiras evidências científicas de que os veículos automotores representavam uma fonte de poluição do ar e causavam efeitos negativos sobre a saúde humana e o bem estar da população foram obtidas em estudos realizados na Califórnia, na década de 1950. Assim, foi constatado que as emissões veiculares necessitavam de medidas de controle (Mendes, 2004).

O Estado da Califórnia estabeleceu sua primeira regulamentação das emissões dos gases de escapamento em 1966. Em 1970 o governo norte-americano estabeleceu a regulamentação federal sobre as emissões veiculares. Países da Comunidade Econômica Européia, Japão e Austrália estabeleceram limites de emissão de poluentes veiculares nas décadas de 1960 e 1970. No Brasil, a regulamentação das emissões veiculares teve início em 1986 com a criação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, o PROCONVE.

O procedimento de certificação dos veículos de acordo com os limites de emissão de poluentes é realizado com base em ensaios de laboratório. O veículo é posicionado em um dinamômetro e conduzido conforme o ciclo de direção estabelecido pela legislação.

### **Modo de operação do veículo**

Os modos de operação do veículo são classificados em: condições estabilizadas, partida a quente e partida a frio. Dentro de cada um desses modos, o veículo pode operar em velocidade constante, parado, em aceleração ou desaceleração. A maior parte dos poluentes é emitida em pequenos episódios de aceleração e desaceleração que acarretam elevados níveis de emissão (Rakha e Ding, 2003; Rouphail *et al.*, 2000). O modo de partida do veículo também exerce influência sobre a quantidade de poluentes emitidos. A partida a frio refere-se ao período inicial de funcionamento do veículo, onde o motor ainda não atingiu a temperatura de trabalho. No período de partida a frio, a quantidade de poluentes emitidos é maior do que em partida a quente e em condições estabilizadas de operação do veículo.

O comportamento das emissões durante a partida a quente é semelhante ao período de partida a frio. A diferença entre a partida a frio e a partida a quente refere-se ao tempo transcorrido entre o desligamento e o religamento do veículo, ao tempo necessário até que o

motor atinja a temperatura de trabalho e a quantidade de poluentes emitidos (Mehta *et al.*, 2003), que são inferiores em relação à partida a frio.

Emissões em condições estabilizadas correspondem ao período após a partida. Neste modo de operação do veículo, as emissões variam em função da ocorrência de eventos de aceleração e desaceleração. A principal influência na variação de emissões durante este período é o modo de condução do veículo pelo motorista.

### **Medição de emissões veiculares**

A medição das emissões de escapamento é utilizada na certificação de veículos novos, verificação da conformidade dos veículos com os programas de inspeção e manutenção (I/M), e criação de fatores de emissão, utilizados na criação e calibração de modelos de estimativa de emissões veiculares (Morey *et al.*, 2000). Os primeiros testes para medições de emissões veiculares foram realizados com o propósito de certificar novos veículos de acordo com os padrões de emissões estabelecidos pelo órgão regulamentador (Wenzel *et al.*, 2000).

### **Medições em laboratório**

A técnica mais utilizada para a medição das emissões de poluentes veiculares é o teste dos veículos em laboratório. Este tipo de teste fornece resultados com maior controle das condições do ambiente. Os testes em laboratório são padronizados por órgãos reguladores e podem ser dinâmicos, onde há carregamento no motor através de ciclos de condução em dinamômetros de chassi, ou estáticos, sem carregamento do motor (Faiz *et al.*, 1996; Wenzel *et al.*, 2000).

**Teste estático** - No teste estático medem-se as concentrações de poluentes emitidos pelo cano de descarga de um veículo estacionado em ponto morto. Uma variante deste ensaio consiste em testar o veículo em ponto morto e aumentar a rotação do motor até 2.500 rpm. O objetivo da alteração na rotação é simular as condições de operação do veículo em condições de carregamento.

**Teste dinâmico** - O veículo é disposto em um dinamômetro de chassi, que simula as forças de inércia e atrito que o veículo enfrentaria em uma via comum. O veículo é conduzido por um homem ou uma máquina seguindo o mais próximo possível as velocidades especificadas por um

ciclo de condução estabelecido. As emissões podem ser medidas de duas formas durante o teste: total geradas durante todo o teste, ou de forma contínua, geralmente a cada segundo.

### **Ciclos de direção**

O ciclo de direção, também chamado de ciclo de operação ou ciclo de condução, é um perfil de velocidade em função do tempo que busca simular as condições médias de tráfego real em uma determinada localidade. Existem diversos ciclos de condução padronizados pelos órgãos oficiais de transporte de todo o mundo. Estes ciclos possuem o propósito de medir e regulamentar as emissões de escapamento e monitorar o consumo de combustível (Montazeri e Naghizadeh, 2003). Os ciclos de direção podem ser divididos em legislativos (ou regulatórios), e não legislativos.

### **Ciclos de direção legislativos**

Os ciclos legislativos têm a função de certificar os veículos novos e de verificar a conformidade dos veículos com os limites impostos nos programas de inspeção e manutenção. Os principais ciclos de direção foram desenvolvidos nos EUA, União Européia e Japão.

**Ciclo FTP** - O ciclo de direção FTP75, ou simplesmente FTP (*Federal Test Procedure*), foi desenvolvido a partir de dados de padrão de condução em tráfego real da cidade de Los Angeles, no início dos anos 1970 (Färnlund e Engström, 2001). O teste possui duração total de 1.874 segundos e uma distância percorrida de 17,77 km, com velocidade média de 34,1 km/h. As emissões de descarga geradas durante o ensaio são armazenadas em três recipientes distintos, um para cada porção do ciclo de condução, permitindo a comparação de diferentes modos de operação, como partida a quente e partida a frio. A primeira etapa do ciclo tem duração de 505 segundos e representa a partida a frio. A segunda parte tem duração de 864 segundos e representa as emissões em condições estabilizadas. A terceira parte do ciclo é idêntica a primeira parte e representa o efeito da partida a quente. O veículo fica parado por 10 minutos entre a segunda e terceira etapa (Dieselnet, 2011). A Figura 9 ilustra o ciclo de direção FTP75.



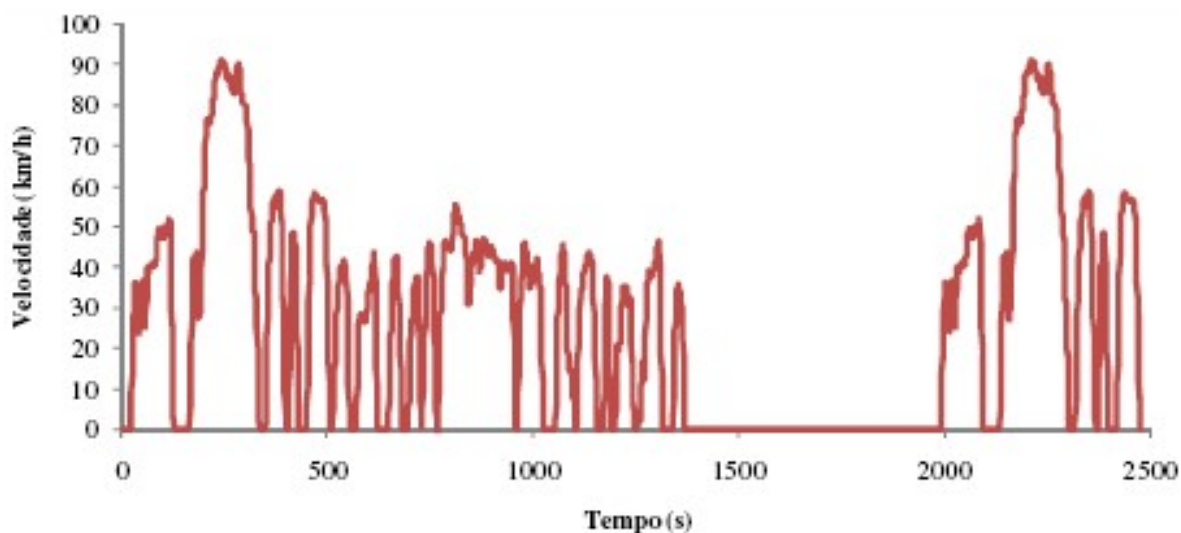


Figura 9 – Ciclo de direção FTP75 (Dieselnet, 2011).

A execução das duas primeiras etapas do ciclo FTP75 apenas também é conhecida como ciclo FTP72, *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS) ou ciclo LA-4. O ciclo FTP72 tem duração de 1.389 segundos e percorre uma distância de 12,1 km com velocidade média de 31,5 km/h. (Dieselnet, 2011; Ottosson, 2007). Foram desenvolvidos ainda complementos para o ciclo de direção FTP, os SFTP (*Supplemental Federal Test Procedure*), para abordar falhas ou representar itens faltantes no ciclo. O complemento US06 foi desenvolvido para tratar das deficiências do ciclo FTP75 em representar a agressividade, alta velocidade e/ou comportamento de direção com aceleração elevada, rápidas flutuações de velocidade e o comportamento do condutor após a partida. O suplemento SC03 foi introduzido para representar o carregamento e o efeito nas emissões de poluentes pelo uso de ar condicionado nos veículos certificados pelo ciclo de direção FTP75 (Barth *et al.*, 2000; Dieselnet, 2011).

**Ciclos ECE+EUDC e NEDC** - O ciclo de direção ECE+EUDC, também conhecido como MVEG-A, é uma combinação de testes de dinamômetro de chassi utilizados para a certificação de veículos na União Européia, e é composto por duas partes. Na primeira, o veículo permanece 20 segundos em ponto morto e em seguida é executado o ciclo chamado ECE (*Economic Commission for Europe Test Cycle*) ou UDC (*Urban Driving Cycle*), que simula o ambiente urbano típico europeu, como por exemplo, Paris ou Roma. A segunda parte, chamada de EUDC (*Extra Urban Driving Cycle*), corresponde a um trajeto rural, que simula modos de condução

mais agressivos e com maior velocidade. A parte urbana do teste é simulada através da repetição do “sub-ciclo” ECE-15 por quatro vezes consecutivas. As duas partes do ensaio são executadas sem interrupção (Tzirakis *et al.*, 2006).

Os 20 segundos iniciais onde o veículo ficava em ponto morto foram excluídos do ciclo de direção no início do ano 2000. Assim, o ciclo passou a ser chamado de NEDC (*New European Driving Cycle*) (Dieselnet, 2011). Ainda, o ciclo de direção utilizado na União Européia é um ciclo artificial, não composto por dados registrados por sequências de direção. Assim, a concordância deste ciclo com o padrão de condução em condições reais pode ser relativamente baixo (Färnlund e Engström, 2001). A Figura 10 ilustra o ciclo de direção NEDC.

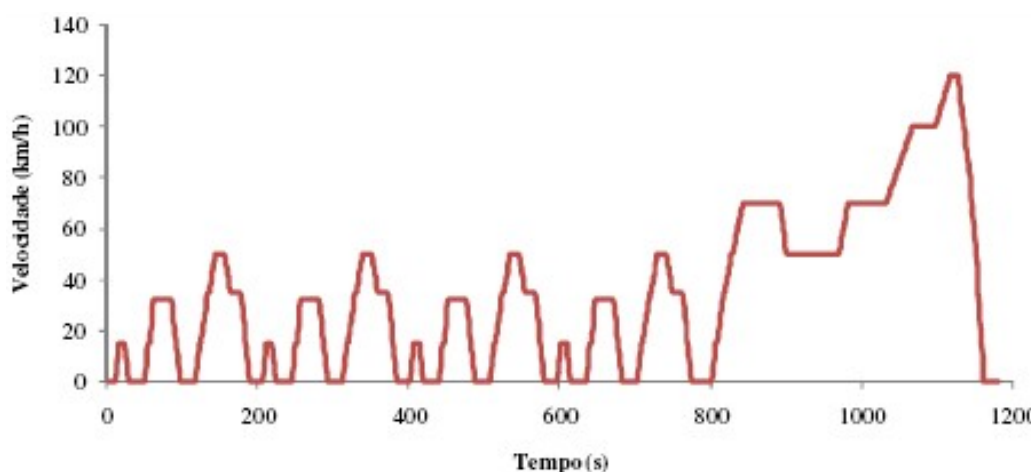


Figura 10 – Ciclo de direção NEDC (Dieselnet, 2011).

**Ciclo 10-15 Mode** - É o ciclo de direção utilizado na regulamentação dos veículos japoneses. Consiste de um período de aquecimento composto por 15 minutos a 60 km/h, um teste em ponto morto, 5 minutos a 60 km/h e um ciclo 15-mode (ciclo que simula condições de direção em trecho urbano). Após o período de aquecimento, o teste é realizado com a repetição de três vezes o ciclo 10-mode e uma vez o ciclo 15-mode. As emissões não são medidas durante o período de aquecimento (Dieselnet, 2011). A Figura 11 ilustra o ciclo de direção 10-15 Mode.

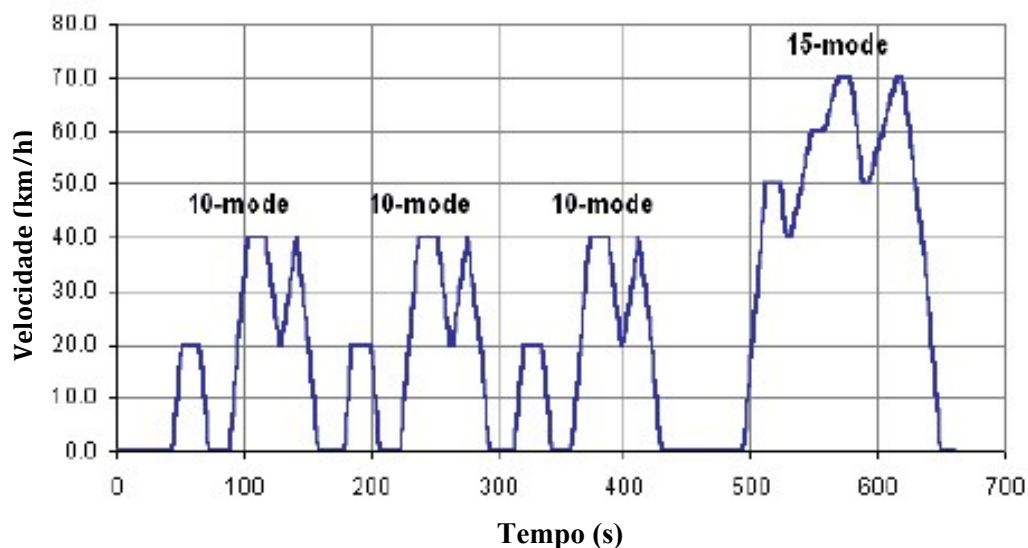


Figura 11 – Ciclo de direção 10-15 Mode (Dieselnet, 2011).

Os ciclos de direção FTP, NEDC e 10-15 Mode também são adotados para a regulamentação em outros países do mundo, como por exemplo Colômbia, Austrália e China. No Brasil, o ciclo de condução utilizado para o teste de medição de emissões é definido pela norma NBR 6601:2001. O ciclo estabelecido pela norma é semelhante ao ciclo FTP. Barth *et al.* (2000) e Morey *et al.* (2000) afirmam que o FTP não representa adequadamente o padrão de direção verificado em condições reais. Ainda, sabe-se que o ciclo europeu ECE também possui deficiências para representar as condições de condução reais (Montazeri e Naghizadeh, 2003).

### Ciclos de direção não legislativos

Como o padrão de condução varia entre as cidades, os ciclos disponíveis obtidos em algumas regiões normalmente não são aplicáveis para outras localidades. Consequentemente vários pesquisadores trabalham na busca do desenvolvimento de ciclos de direção usando dados de testes de direção em condições realísticas (Montazeri e Naghizadeh, 2003). Os ciclos não legislativos encontram uma grande aplicação em pesquisas sobre conservação de energia e medição de poluição veicular (Tzirakis *et al.*, 2006).

**Ciclos curtos de direção INRETS** - os ciclos de direção com curta duração, também chamados de subciclos, normalmente variam entre 100 e 300 segundos. O laboratório francês INRETS desenvolveu três tipos de ciclos curtos de direção: (i) *INRETS urban lent court* (IULC),

com duração de 208 segundos, (ii) *INRETS urban fluid court* (IUFC), que possui 189 segundos de duração e velocidade máxima de 44 km/h, e (iii) *INRETS route court* (IRC), com 126 segundos de duração (Joumard *et al.*, 1995). Os ciclos curtos foram criados com base em 23.000 km percorridos e registrados em toda a França por 35 veículos particulares. Estes ciclos são bastante empregados em medições para a determinação do excesso de poluentes por partida a frio. Nestas medições os ciclos curtos são repetidos 15 vezes no mesmo ensaio (Joumard e Serié, 1999; Weilenmann *et al.*, 2005). As Figuras 12 a 14 ilustram os ciclos curtos de direção desenvolvidos pelo INRETS.

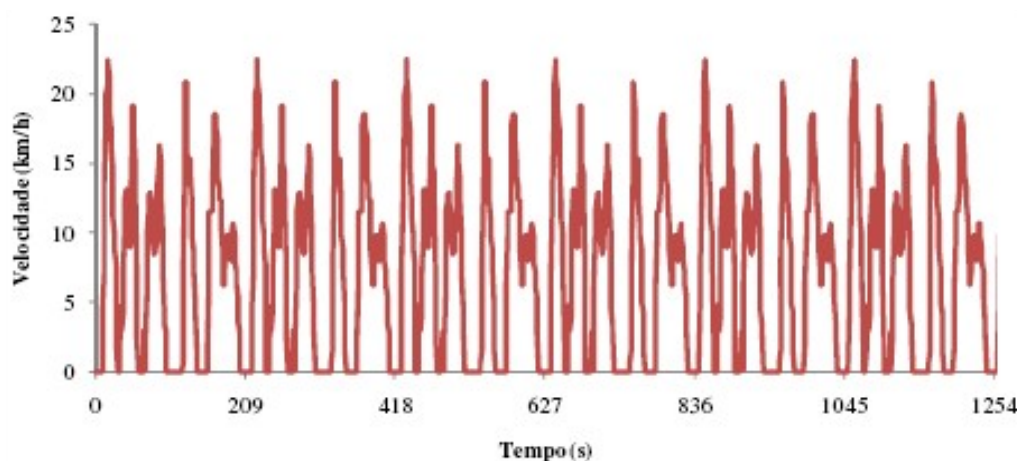


Figura 12 – Ciclo curto de direção IULC (Dieselnet, 2011).

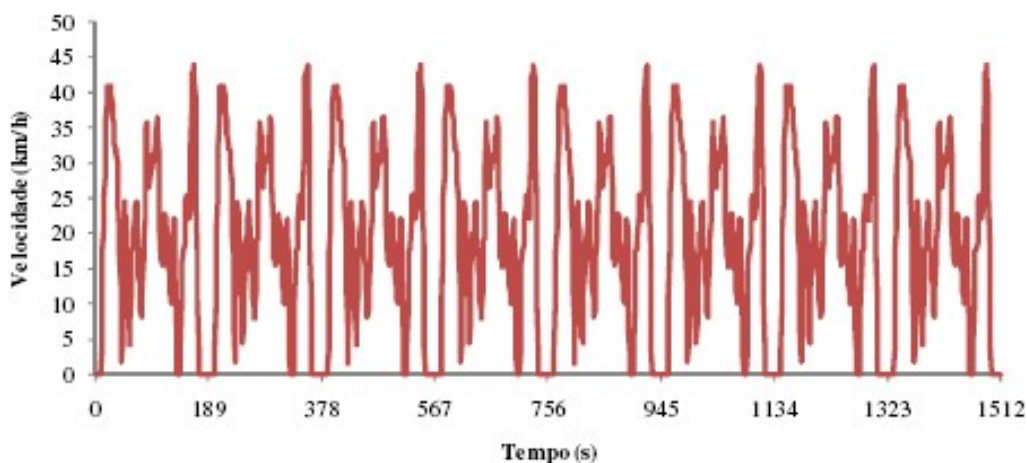


Figura 13 – Ciclo curto de direção IUFC (Dieselnet, 2011).

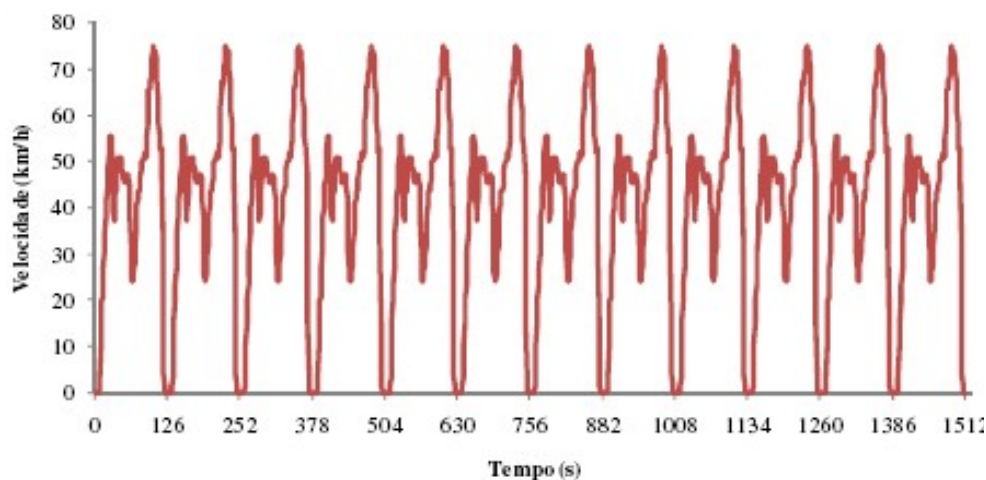


Figura 14 – Ciclo curto de direção IRC (Dieselnet, 2011).

Embora não seja possível definir apenas um ciclo de direção que represente todas as condições de tráfego, a caracterização do comportamento médio de condução é um elemento importante na descrição do total de poluentes emitidos pela frota.

### 2.3.1 Formação de poluentes

As fontes de emissões veiculares são geralmente categorizadas em dois tipos: emissões evaporativas (evaporação do combustível líquido), e emissões de escapamento ou descarga (queima do combustível).

As emissões evaporativas são vinculadas à variação de temperatura ambiente ou do próprio veículo, e são compostas basicamente por hidrocarbonetos. Foram classificadas por Mehta *et al.* (2003) como provenientes do resfriamento do motor, da operação do veículo e do respiro do tanque de combustível. Tendem a ser minimizadas a partir do emprego de novas tecnologias nos sistemas alimentação e tanques.

As emissões de descarga são formadas pelos produtos da queima da mistura ar-combustível nos motores de combustão interna, e representam cerca de 80% das emissões totais (FEAM, 2006). Os combustíveis utilizados nos motores Diesel são hidrocarbonetos mais pesados e menos voláteis, como o óleo Diesel (Faiz *et al.*, 1996).

Os motores Diesel possuem um rendimento termodinâmico superior ao dos motores de ciclo Otto, por trabalharem com maiores temperatura e pressão. Ainda, estes motores sempre operam com excesso de ar, contribuindo para uma queima mais completa do combustível. Motores ciclo Diesel são os principais responsáveis pela emissão de material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), além de contribuírem muito para a poluição sonora (Faiz *et al.*, 1996).

Dentre os poluentes primários emitidos pelo motor Diesel (produzidos diretamente pela fonte de emissão) estão o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), os hidrocarbonetos (HC), o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e os materiais particulados (MP). É importante ressaltar que o  $\text{CO}_2$  não é considerado um poluente local, apesar de ser o principal gás de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global.

Como poluentes secundários (aqueles formados na atmosfera como o resultado de reações químicas ou fotoquímicas envolvendo os poluentes primários) associados ao motor Diesel, estão o dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), os oxidantes fotoquímicos (como o ozônio), o ácido sulfúrico, o ácido nítrico e seus sais (como os aerossóis de sulfatos e nitratos) (Onursal e Gautam, 1997; Loureiro, 2005).

Os poluentes controlados pela legislação e que incidem em grande quantidade no período de início de funcionamento a frio do motor a Diesel são os hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), o material particulado (MP) e o Índice de Opacidade.

#### **2.3.1.1 Formação de Material Particulado - MP**

Segundo a EPA (U.S. Environmental Protection Agency, 2010), o material particulado é definido como qualquer massa coletada em um filtro posicionado na exaustão de um veículo após um determinado ciclo de operação, com a temperatura de exaustão mantida a 52 °C. O material particulado produzido por um motor Diesel consiste, basicamente, de aglomerados de núcleos de carbono e de hidrocarbonetos, sulfato ( $\text{SO}_3$ ) e água adsorvidos ou condensados sobre esses núcleos carbônicos. O material particulado forma-se em altas temperaturas, em regiões da câmara de combustão ricas em combustível, a partir de gotículas individuais.

É importante salientar que o material particulado apresenta uma estrutura complexa, que depende de vários fatores como o tipo de motor, carga, modo de condução do veículo, qualidade do óleo lubrificante do motor e combustível utilizado.

O material particulado é o poluente que mais caracteriza o motor Diesel, responsável pela tradicional emissão da fumaça preta muito prejudicial ao organismo humano. O início de sua formação acontece durante o processo de combustão ainda dentro dos cilindros do motor, principalmente devido à utilização de combustíveis com elevada massa molar (Garcia, 2002). O sistema de escape do motor também exerce grande influência sobre a formação do material particulado porque promove a aglomeração dos hidrocarbonetos e ácido sulfúrico, condensados durante o resfriamento dos gases na fase de exaustão. O núcleo do material particulado é basicamente um composto sólido formado de carbono e partículas metálicas aglomeradas vindas do sistema de lubrificação. A aglomeração dos átomos de carbono forma plaquetas cristalinas com arranjos hexagonais que se unem e ficam dispostas em camadas de 2 a 5 níveis formando estruturas próprias compondo assim a partícula.

A Figura 15 ilustra a estrutura do material particulado, composto pelas plaquetas de carbono.

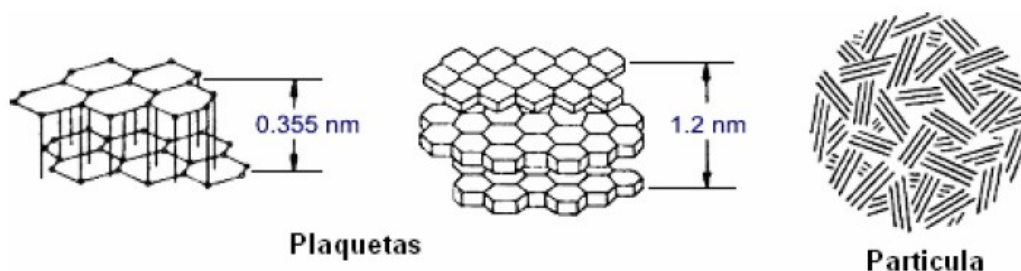


Figura 15 – Estrutura do material particulado (Heywood, 1988).

Sob condições ideais, todo o carbono do Diesel e todo o hidrogênio queimarão como dióxido de carbono e vapor de água respectivamente. Porém, se existe enxofre no combustível, ele será oxidado. Estes óxidos de enxofre podem reagir com o vapor de água e formar ácido sulfúrico e outros compostos. Os sulfatos podem formar partículas no escape e elevar o nível de material particulado. Com uma quantidade de enxofre no combustível menor que 15ppm é possível eliminá-lo como componente de emissão de material particulado introduzindo um



sistema de pós-tratamento de gases de escape do motor Diesel (*Diesel Particulate Filter* –DPF). O enxofre é um dos limitadores de opções disponíveis para se controlar as emissões de motores.

#### **2.3.1.1.1 Formação de Fumaça Branca e Preta**

O material particulado presente na exaustão do motor compõe-se de partículas de fumaça e de hidrocarbonetos com alto peso molecular (fração orgânica solúvel). Obert (1971) explica que devido às características de formação de mistura e da combustão heterogênea no motor Diesel, pode aparecer fumaça nos gases de descarga, que pode ser classificada ou como fumaça quente (preta) ou fumaça fria (branca).

A fumaça fria consiste em uma névoa de partículas de óleo lubrificante ou de combustível líquido não queimado e resulta do resfriamento da combustão, especialmente em marcha lenta ou carga leve, quando a relação de mistura combustível e ar é elevada. Essa fumaça fria é agravada com o ar frio, ou por contato do combustível com as paredes frias da câmara.

A fumaça quente é formada por partículas carbonáceas de combustível e apresenta-se como cinza-clara ou negra. A fuligem forma-se diretamente pela deficiência de ar para a combustão completa. A fumaça aparece quando o motor é super solicitado em altos regimes e altas cargas.

Reduzindo-se a carga ou otimizando a mistura, a fumaça quente pode ser eliminada e, de maneira correspondente, pode-se eliminar a fumaça fria através do aumento da taxa de compressão ou usando combustíveis de número de cetano mais elevado (van Gerpen, 2006).

Parâmetros importantes para a formação de fumaça branca:

- Temperatura do gás ao final do estágio de compressão. Depende da temperatura ambiente, pressão de compressão, taxa de compressão, *blowby* e transferência de calor entre as paredes do cilindro;
- Temperatura das paredes do cilindro;
- Temperatura ambiente;
- Qualidade do combustível, principalmente o número de cetano e volatilidade;
- Tempo de injeção do combustível;
- Qualidade da injeção do combustível (formato do *spray* de combustível injetado);
- Projeto da câmara de combustão;



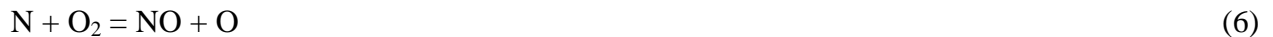
- Auxiliar de partida utilizado no momento da partida.

### 2.3.1.2 Formação de Óxidos de Nitrogênio - NO<sub>x</sub>

A denominação NO<sub>x</sub> refere-se ao óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), isto é, NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>. Nas emissões de motores Diesel, o óxido nítrico (NO) é normalmente o mais abundante e constitui de 70 a 90% do total de NO<sub>x</sub>.

O NO é formado a partir do processo de combustão e o NO<sub>2</sub> formado a partir do NO disponível na câmara de combustão. Os mecanismos de formação destes poluentes são fortemente afetados pela temperatura, pressão, condições da chama e concentrações dos demais componentes na combustão.

A formação do NO se dá ao longo da faixa de alta temperatura dos gases queimados próxima da chama, através de reações químicas que envolvem átomos de nitrogênio e de oxigênio (presentes no ar limpo admitido) e moléculas que não atingiram equilíbrio químico (Heywood, 1988). A formação de NO pode ser descrita pelos seguintes processos químicos:



A formação do dióxido de nitrogênio pode ser descrita por:



Consequentemente, a conversão de NO<sub>2</sub> para NO ocorre pela reação:



A taxa de formação de moléculas de NO é diretamente proporcional à temperatura no interior da câmara de combustão e à concentração de oxigênio, como ilustra a Figura 1616.

Nos motores de combustão interna com ignição por compressão o NO<sub>2</sub> pode atingir valores entre 10 e 30% do total de NO<sub>x</sub> presente na exaustão.

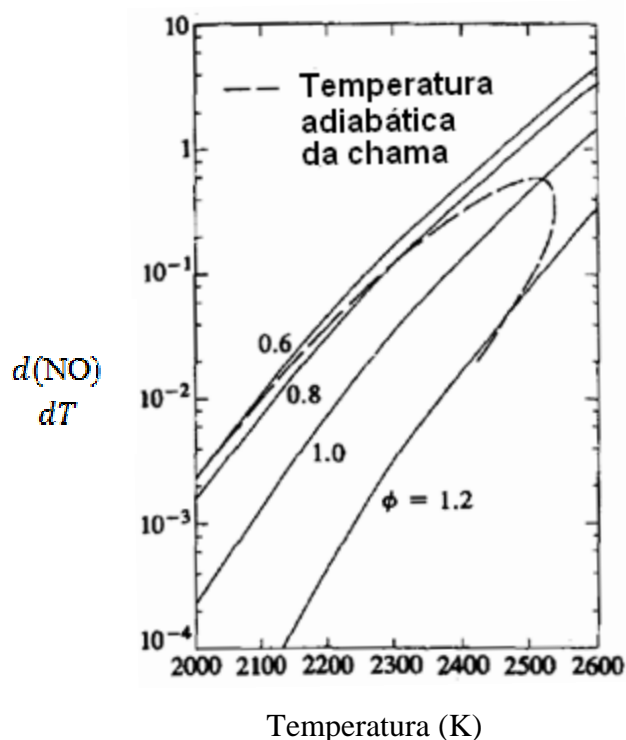


Figura 16 – Taxa de criação de moléculas de NO em função da temperatura para diferentes razões de equivalência (Heywood, 1988).

Vê-se que a temperatura no interior da câmara de combustão é fator preponderante para aumentar a taxa de produção de moléculas de NO, mesmo em razões de equivalência acima e abaixo do ponto de mistura estequiométrica (razão de equivalência unitária).

Dessa forma, um método eficiente na redução da formação de NO é o controle da temperatura da combustão, e uma forma de reduzir a temperatura da combustão é adicionar ao cilindro um gás inerte. Diversos gases têm sido avaliados para cumprir essa tarefa, conforme pode ser visto na Figura 17.

Observa-se que a presença de gases diluentes misturados com o ar limpo admitido constitui um eficiente meio de reduzir a produção de óxidos de nitrogênio. O gás de escape do próprio motor também foi avaliado no ensaio e mostrou ser um eficiente diluente. Portanto, um meio prático de reduzir as emissões de poluentes em motores Diesel é a readmissão de uma parcela dos gases provenientes do escape.

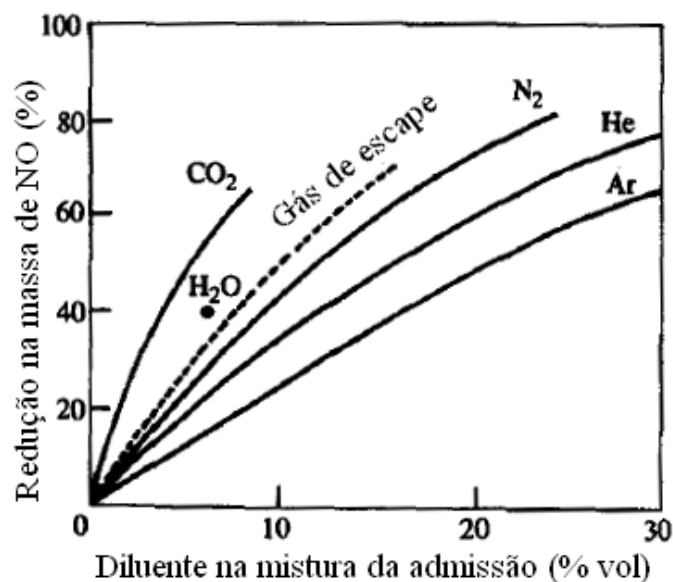


Figura 17 – Redução da massa de NO em função da concentração de diversos gases na admissão (Heywood, 1988).

Como já mencionado, o  $\text{NO}_x$  expressa a somatória de NO com  $\text{NO}_2$  constituindo o poluente sem dúvidas mais tóxico emitido pela combustão do Diesel.  $\text{NO}_x$  é um precursor do ozônio e desempenha um importante papel na poluição química do ar. As concentrações do  $\text{NO}_x$  na saída do escape normalmente variam de 50 a 5.000 ppm.

### 2.3.1.3 Formação de Monóxido de Carbono – CO

A combustão de hidrocarbonetos é um processo de oxi-redução, ocorrendo a oxidação do carbono e a redução do hidrogênio, com liberação de energia e formação de novos compostos, sendo o principal elemento o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Quando a quantidade de oxigênio presente na mistura ar/combustível é insuficiente para promover a completa oxidação do carbono presente na câmara de combustão ocorre à formação de monóxido de carbono (CO).

Motores Diesel operam com misturas mais pobres, consequentemente suas emissões de monóxido de carbono são mais baixas e, geralmente, não são consideradas um problema. A necessidade de enriquecimento da mistura quando o motor está frio faz com que as emissões de

monóxido de carbono durante o aquecimento do motor sejam muito maiores em relação à operação do motor completamente aquecido.

#### **2.3.1.4 Formação de Hidrocarbonetos – HC**

Em motores de combustão interna com ignição por compressão são duas as causas principais da presença de combustível não queimado na exaustão (Heywood, 1988):

- o combustível misturado entre o início da injeção e o início da combustão é mais pobre que o limite de mistura pobre adequado para o motor;
- a não ocorrência de mistura do combustível com o ar devido à baixa velocidade do combustível ao sair dos furos do bico injetor.

A emissão de hidrocarbonetos não queimados, ou substâncias orgânicas de um modo geral, resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos (Degobert, 1995). Contrariamente ao CO e NO<sub>x</sub>, que são formados em uma fase homogênea a elevada temperatura, os hidrocarbonetos resultam a partir de efeitos heterogêneos na mistura e na vizinhança com as paredes do cilindro, consequentemente a uma temperatura mais baixa.

Os aromáticos são uma classe de hidrocarbonetos que são caracterizados por uma estrutura química estável. Eles estão frequentemente presentes no óleo Diesel combustível em níveis entre 25 e 35%. São considerados benéficos para a operação de motores Diesel porque provêem grande quantidade de energia por litro de combustível, mas contribuem para maior emissão de particulado e NO<sub>x</sub>. O BioDiesel não contém compostos aromáticos.

#### **2.3.1.5 Normas de emissões de poluentes**

Na década de 1950 diversas pesquisas realizadas no Estado da Califórnia (EUA) mostraram as primeiras evidências científicas de que os veículos automotores eram uma fonte significativa de poluição responsável por danos à saúde e ao bem estar da população e, consequentemente, precisava de medidas de controle (La Rovere *et al.*, 2007). Com base nestes resultados, o Estado da Califórnia foi o pioneiro em introduzir medidas no controle de emissões de poluentes atmosféricos, sendo que em 1966 foram promulgados os primeiros limites para emissões

provenientes dos escapamentos de veículos leves (abaixo de 3.855 kg – 8.500 lb.) (DEPS, 2008; La Rovere *et al.*, 2007). A partir de 1968 este controle foi expandido para o restante dos EUA. Ao se comparar as emissões veiculares de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) no início da década de 1960, quando não havia controle das emissões veiculares, com os valores estipulados pela norma vigente para veículos leves fabricados a partir de 2004 nos EUA, observa-se que houve uma redução de 99%, 96% e 99% respectivamente para os poluentes citados (DEPS, 2008).

Na Figura 18 é possível observar a evolução das normas para controle de emissões de veículos leves nos EUA (HC, CO e NO<sub>x</sub> estão combinados apenas para ilustração):

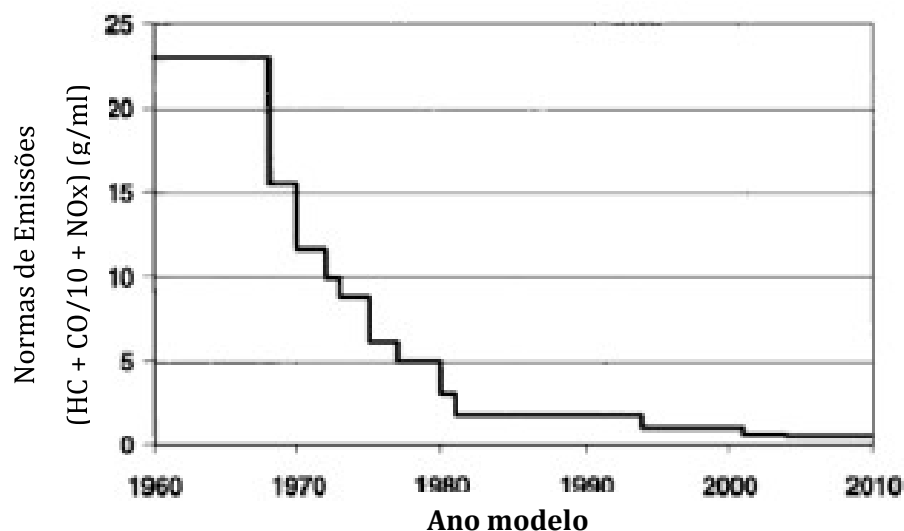


Figura 18 – Evolução das normas de emissões para veículos leves nos EUA (DEPS, 2008).

Já o controle de emissões para veículos pesados (acima de 3855 kg – 8500 lb.) também teve seu início na Califórnia em 1969, e no restante dos EUA em 1974. A Figura 19 mostra a evolução dos limites de emissões para controle dos óxidos de nitrogênio e do material particulado para veículos pesados:

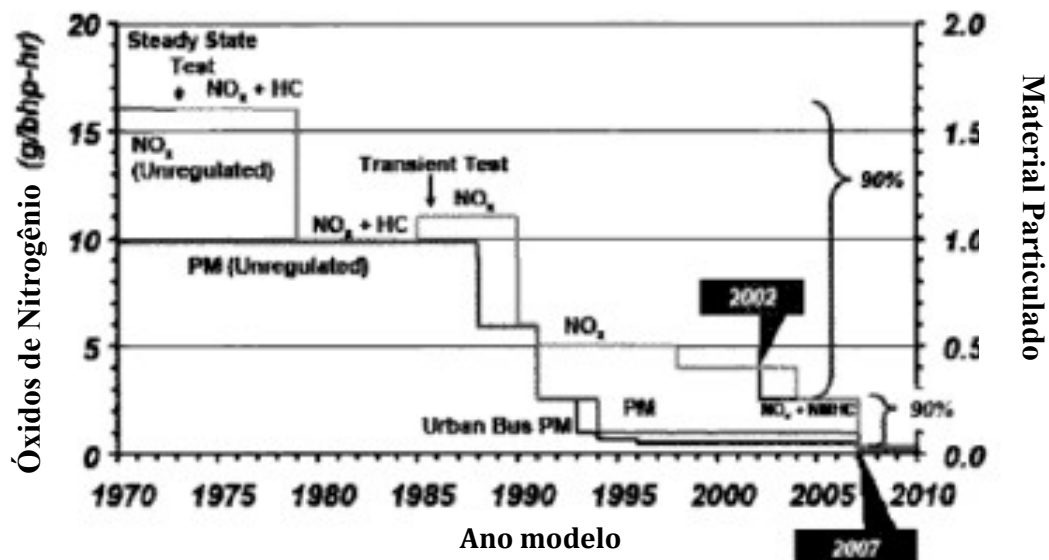


Figura 19 – Evolução do controle de NOx e MP em veículos pesados nos EUA (DEPS, 2008).

Na Europa o controle de emissões veiculares foi iniciado em 1970 através da diretiva 1970/220/EC nos veículos leves (até 3.500 kg) e em 1988 através da diretiva 1988/77/EC nos veículos pesados (acima de 3.500 kg) (European Commission, 2008). Em 1992, baseado na diretiva de 1988, foi promulgada a norma EURO I para veículos pesados nos países pertencentes à União Européia. Para veículos equipados com motores Diesel, o controle das emissões de óxidos de nitrogênio foi o objetivo inicial desta norma, porém também foram introduzidos limites para monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados (Roadtransport, 2006). Atualmente a norma que rege o limite de emissões na União Européia para os veículos comercializados é a EURO V (European Commission, 2008).

As Tabelas 1 e 2 mostram os limites de emissões de acordo com a evolução das normas européias para veículos comerciais movidos à Diesel.

Tabela 1 – Evolução das normas de emissões europeias para veículos comerciais leves  
(Dieselnet, 2011).

Normas de emissões Europeias para veículos comerciais leves (g/km)							
Category†	Tier	Date	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
<b>N<sub>1</sub>, Class I</b> ≤1305 kg	Euro 1	1994.10	2.72	-	0.97	-	0.14
	Euro 2, IDI	1998.01	1.0	-	0.70	-	0.08
	Euro 2, DI	1998.01 <sup>a</sup>	1.0	-	0.90	-	0.10
	Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05
	Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025
	Euro 5	2009.09 <sup>b</sup>	0.50	-	0.23	0.18	0.005 <sup>a</sup>
	Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005 <sup>a</sup>
<b>N<sub>1</sub>, Class II</b> 1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5.17	-	1.40	-	0.19
	Euro 2, IDI	1998.01	1.25	-	1.0	-	0.12
	Euro 2, DI	1998.01 <sup>a</sup>	1.25	-	1.30	-	0.14
	Euro 3	2001.01	0.80	-	0.72	0.65	0.07
	Euro 4	2006.01	0.63	-	0.39	0.33	0.04
	Euro 5	2010.09 <sup>c</sup>	0.63	-	0.295	0.235	0.005 <sup>a</sup>
	Euro 6	2015.09	0.63	-	0.195	0.105	0.005 <sup>a</sup>
<b>N<sub>1</sub>, Class III</b> >1760 kg	Euro 1	1994.10	6.90	-	1.70	-	0.25
	Euro 2, IDI	1998.01	1.5	-	1.20	-	0.17
	Euro 2, DI	1998.01 <sup>a</sup>	1.5	-	1.60	-	0.20
	Euro 3	2001.01	0.95	-	0.86	0.78	0.10
	Euro 4	2006.01	0.74	-	0.46	0.39	0.06
	Euro 5	2010.09 <sup>c</sup>	0.74	-	0.350	0.280	0.005 <sup>a</sup>
	Euro 6	2015.09	0.74	-	0.215	0.125	0.005 <sup>a</sup>
† Para as normas Euro 1 e Euro 2 as categorias de massa N1 eram Class I ≤ 1250 kg, Class II 1250-1700 kg, Class III > 1700 kg. a - até 30.09.1999 (após esta data os motores diesel de injeção direta devem atender os limites IDI) b - 01.2011 para todos os modelos c - 2012.01 para todos os modelos d - aplicável somente para veículos com motores diesel de injeção direta e - proposto alteração para 0.003 g/km utilizando o procedimento de medição PMP							

Tabela 2 – Evolução das normas de emissões europeias para veículos comerciais pesados (Dieselnet, 2011).

Normas de emissões Europeias para veículos comerciais pesados (g/kWh) (fumaça em m <sup>-1</sup> )							
Tier	Date	Test	CO	HC	NOx	PM	Smoke
Euro I	1992, < 85 kW	<u>ECE R-49</u>	4.5	1.1	8.0	0.612	
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36	
Euro II	1996.10		4.0	1.1	7.0	0.25	
	1998.10		4.0	1.1	7.0	0.15	
Euro III	1999.10, <i>EEVs only</i>	<u>ESC &amp; ELR</u>	1.5	0.25	2.0	0.02	0.15
	2000.10	<u>ESC &amp; ELR</u>	2.1	0.66	5.0	0.10 0.13 <sup>a</sup>	0.8
Euro IV	2005.10		1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	2008.10		1.5	0.46	2.0	0.02	0.5
Euro VI†	2013.01		1.5	0.13	0.4	0.01	
† Proposta (16.12.2008) a – para motores com volume de deslocamento menor do que 0.75 dm <sup>3</sup> por cilindro e rotação de máxima potencia maior do que 3000 min <sup>-1</sup>							

Para os veículos pesados do ciclo Diesel os limites de emissão dos veículos novos são expressos em g/kWh, que relaciona a “*massa do poluente emitida por hora por unidade de potência efetiva líquida*”. Os poluentes regulamentados para os veículos pesados a Diesel, ficaram restritos ao monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), o óxido de nitrogênio (NOx), material particulado (MP) e um valor limite para o índice de fumaça, sem abranger todos os poluentes e, em especial, aqueles de efeito estufa, bem como não se encontram expressos em g/km. Existe certa dificuldade em se comparar fatores de emissões em g/km, principalmente devido às variáveis e índices envolvidos nas estimativas das emissões dos poluentes, o tipo de combustível e tecnologia automotiva de combustão e as condições de tráfego que são diferenciadas.

No Brasil a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB é um órgão técnico conveniado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA que é responsável pela homologação de veículos em todo território nacional, tendo também a responsabilidade pela implantação e operacionalização do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE (CETESB, 2009).



O PROCONVE foi instituído em 1986 através da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA 18/86 e pela Lei 8723 (La Rovere *et al.*, 2007). Este programa foi desenvolvido com a adoção de procedimentos utilizados internacionalmente para ensaio de veículos, motores e medição de poluentes, com o objetivo de estabelecer um padrão normativo no Brasil (CETESB, 2009).

Para os veículos leves (aqueles com massa total máxima autorizada até 3.856 kg e massa em ordem de marcha para realização do ensaio até 2.720 kg), foram adotados os procedimentos norte-americanos de ensaio do veículo para medição dos gases de escapamento e evaporação de combustível. Para os veículos pesados (aqueles com massa total máxima autorizada superior a 3.856 kg e massa em ordem de marcha para realização do ensaio superior a 2.720 kg), tendo em vista a tradição europeia no desenvolvimento de motores a Diesel e uma vez que os veículos pesados são em sua grande maioria equipados por estes motores no Brasil, foram adotados os procedimentos europeus para ensaio do motor e medição da emissão dos gases de escapamento. Outro motivo da adoção destes procedimentos está no fato de que estes ensaios requererem o uso de bancos dinamométricos mais simples, já presentes na maioria dos fabricantes instalados no País (La Rovere *et al.*, 2007).

### **Método dos 13 pontos**

Este método de cálculo de emissões veiculares para ônibus e caminhões consiste em uma avaliação do motor em 13 regimes constantes de funcionamento que são ponderados com fatores tomados como representativos do uso médio dos veículos pesados. Este procedimento fornece resultados em g/kWh, correlacionando a emissão de poluentes com a produção de energia do motor, e não com o movimento do veículo. Os ensaios dão como resultados, valores de consumo específico de combustível, torque, potência e emissão específica de CO, NOX, HC e MP.

A legislação brasileira de emissões para os veículos pesados do ciclo Diesel, segue a regulamentação europeia, de forma que os ciclos adotados para a homologação destes motores são:

**Ciclo ECE (13 pontos antigo)** – utilizado até o ano de 2004 para todos os tipos de motores e combustíveis;

**Ciclo ESC (Ciclo Europeu em Regime Constante)** (13 pontos novo) – utilizado desde 2004 para motores do ciclo Diesel sem dispositivos de pós-tratamento de gases (catalisador, filtros, etc.);

**Ciclo ETC (Ciclo Europeu em Regime Transiente)** – ciclo transiente onde são definidas duas curvas rpm  $\times$  tempo e torque  $\times$  tempo a serem seguidas simultaneamente, como sendo representativas dos usos em trânsito urbano, rural e de estrada – utilizado desde 2005 para motores a gás natural e todos os motores com pós-tratamento de gases de escapamento.

**Ciclo ELR (Ciclo Europeu de Resposta em carga)** – ensaio que mede o nível de obscurecimento da luz (opacidade) pela fumaça preta do escapamento do motor.

Os ensaios de homologação (de níveis de emissão) de motores novos a Diesel têm sido realizados no Brasil segundo o ciclo de 13 pontos, onde apenas 13 pontos com diferentes condições de carga e rotação são utilizados para a avaliação dos motores. A Figura 20 descreve o ciclo ESC. No ciclo transiente, inúmeros pontos de rotação e carga são utilizados para tentar simular as condições reais de operação de um veículo. Para as futuras homologações o ensaio no ciclo transiente será mandatório para todos os motores Diesel.

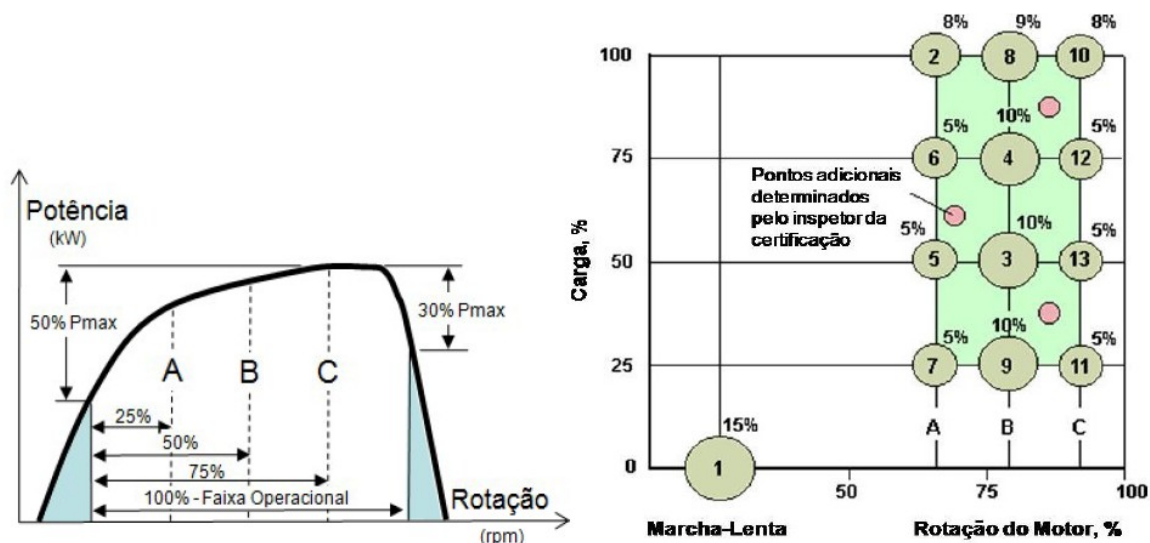


Figura 20 – Ciclo de 13 pontos (ESC) (Dieselnet, 2011).

A Tabela 3 mostra as variações de rotações, cargas, fator peso e duração de cada modo do ciclo ESC (13 pontos). As rotações A, B e C são obtidas conforme os pontos na Figura 20.

Para a execução do ensaio ESC, o motor é aquecido e ajustado na condição de máxima potência. Em seguida, os modos que compõem o teste são medidos.

Tabela 3 – Ciclo ESC composto por 13 modos em função de rotação e carga respectivamente (CETESB, 2009).

<b>Modo ( - )</b>	<b>Rotação ( - )</b>	<b>Carga ( % )</b>	<b>Fator Peso ( % )</b>	<b>Duração ( minutos )</b>
1	Marcha Lenta	0	15	4
2	A	100	8	2
3	B	50	10	2
4	B	75	10	2
5	A	50	5	2
6	A	75	5	2
7	A	25	5	2
8	B	100	9	2
9	B	25	10	2
10	C	100	8	2
11	C	25	5	2
12	C	75	5	2
13	C	50	5	2

A medição do MP ocorre primeiramente com um teste em aberto para determinação das vazões de gases de escape. É feita uma pesagem inicial dos filtros primário e secundário e ao final do ensaio de 13 pontos repete-se as pesagens.

Outro princípio utilizado no desenvolvimento do PROCONVE, assim com realizado em outros países, foi a adoção de limites progressivamente mais restritivos no controle de emissões. No caso dos limites para veículos pesados, os limites adotados são similares aos limites utilizados na Europa, porém no Brasil há uma defasagem temporal da norma nacional vigente com relação à respectiva norma européia. É comum encontrar na literatura disponível as fases do PROCONVE relacionadas com as normas de emissões européias.

Na Tabela 4 pode-se observar a evolução das normas de emissões brasileiras e a respectiva equivalência com a norma européia:

Tabela 4 – Evolução das normas de emissões brasileiras para veículos comerciais pesados (CETESB, 2009).

Datas de implantação dos novos limites de emissões para veículos pesados (1)		
Data	Fase do PROCONVE	Aplicação
jan/04	P – 5 (Similar a EURO III)	100% ônibus urbanos ou
		60% ônibus urbanos (2)
jan/05	P – 5 (Similar a EURO III)	100% microônibus
		100% ônibus urbanos (3)
		40% demais veículos ou
		60% demais veículos (3)
jan/06	P – 5 (Similar a EURO III)	100% demais veículos
jan/09	P – 6 (4) (Similar a EURO IV)	Todos os veículos
jan/12	P – 7 (5) (Similar a EURO V)	Todos os veículos
<p>1 - Conforme a Resolução CONAMA nº 315/02. "P" = veículos pesados.</p> <p>2 - O fabricante poderá optar por 60% desta data, a ser integralizado em jan/05 e, neste caso, deverá atender com 60% dos demais veículos em jan/05.</p> <p>3 - No caso da opção 2.</p> <p>4 - Fase não implantada por problemas de disponibilidade nacional do óleo diesel adequado a essa fase. Os limites da fase P7 irão recuperar os ganhos ambientais da fase P6.</p> <p>5 - Conforme a Resolução CONAMA nº 403/08.</p>		

Desde o início do programa em 1986, houve uma redução na emissão de poluentes de veículos novos em cerca de 97%. Esta redução ocorreu através da introdução de tecnologias como catalisador, injeção de combustível controlada eletronicamente e melhorias nos combustíveis automotivos (CETESB, 2009).

Uma nova tecnologia no mercado para obtenção de níveis de emissões futuros utiliza um sensor de pressão de combustão integrado à vela aquecedora para medir o processo de combustão. Informações sobre o atraso de ignição da combustão e formação de poluentes abrirão maiores possibilidades de controle do motor para a redução do consumo de combustível e emissões de poluentes.

### 2.3.2 Estimativas de emissões veiculares

Modelos de emissão veicular são utilizados para estimar a emissão de poluentes do tráfego, em função da dificuldade de se medir estas emissões. Estes modelos podem ser classificados em dois tipos: estáticos e dinâmicos (Cappiello, 2002). A calibração dos modelos é realizada em laboratório através de testes em dinamômetros de chassi, ou por medições a bordo, realizados em condições reais.

### **Modelos de emissões estáticos**

Modelos baseados na velocidade média, também chamados de modelos estáticos ou modelos de inventário, são mais comumente utilizados na estimativa de emissões do tráfego rodoviário (Sturm *et al.*, 1998). Este tipo de modelo considera valores médios das variáveis de tráfego e distribui as emissões uniformemente por toda a rede. Basicamente, a distância percorrida pelos veículos em um determinado período em uma determinada área e fatores específicos de emissão para cada tipo de veículo ou tecnologia do motor são utilizados na estimativa da emissão de poluentes.

Estes modelos, normalmente, não consideram fatores como os eventos de aceleração e de desaceleração ou as partidas a frio do motor, que exercem grande influência na emissão de poluentes, especialmente em áreas urbanas. A identificação dos locais onde ocorrem as viagens com partida a frio permite que o adicional de poluentes emitidos nesta situação seja contabilizado separadamente, melhorando a qualidade da estimativa total de poluentes (Hansen *et al.*, 2007).

Os modelos estáticos mais utilizados compreendem: o modelo MOBILE6 (EPA, 2010), o modelo EMFAC (*EMission FACtor*) (CARB, 2007) e o modelo COPERT 4 (*COMputer Programme to calculate Emissions from Road Transport Model*) (EEA, 2007).

**Modelo MOBILE** – Esse modelo calcula as emissões médias da frota para HC, CO e NO<sub>x</sub> e emissões evaporativas. A estimativa das emissões pode ser realizada para veículos particulares, caminhões, ônibus e motocicletas, movidos a gasolina, óleo Diesel ou gás natural veicular. O MOBILE 6.2 considera ciclos de direção associados ao tipo de via, com diferentes níveis de congestionamento. Este modelo vem sendo aplicado em diversos países e adaptado de acordo com as características locais.

**Modelo EMFAC** – O modelo EMFAC foi desenvolvido pelo *California Air Resource Board* para estimar taxas de emissões para HC, CO, NO<sub>x</sub>, PM, SO<sub>2</sub>, Pb, e CO<sub>2</sub>, bem como o

consumo de combustível. O EMFAC fornece fatores de emissão separadamente para partidas a frio, partidas a quente e em condições estabilizadas (CARB, 2007).

**Modelo COPERT** – O modelo COPERT 4 calcula as emissões produzidas por um ou mais veículos em um ano (Bel *et al.*, 2005; EEA, 2007). Considera basicamente dois fatores de emissões: (i) fatores de emissões quentes e (ii) fatores de emissões frias, uma vez que a quantidade de poluentes produzida por um veículo depende diretamente da temperatura do motor. Fatores de emissões quentes correspondem à quantidade de emissões produzidas em condições de temperatura estabilizada do motor, enquanto que os fatores de emissões frias referem-se aos poluentes gerados no período em que o motor ainda não atingiu a temperatura adequada.

### **Modelos de emissão dinâmicos**

Na abordagem dinâmica, as emissões são medidas continuamente em testes de dinamômetros de chassi e armazenadas em intervalos de tempo, geralmente, a cada segundo (Cappiello, 2002). As condições operacionais dos veículos em um determinado tempo, associadas a um valor de velocidade, são registradas simultaneamente com a quantidade de poluentes emitida. Assim, é possível gerar funções de emissão para cada condição de operação do veículo (Sturm *et al.*, 1998). Outras variáveis também podem ser consideradas, como a rotação do motor, a posição do acelerador, o uso do ar condicionado, ou ainda, a transição de marchas no câmbio.

A seguir são apresentados os principais modelos de emissões dinâmicos citados na literatura.

**Modelo IVE** (*International Vehicle Emissions*) – Esse modelo foi desenvolvido pelo *International Sustainable Systems Research Center* (ISSRC) e a Universidade da Califórnia em Riverside com financiamento da U.S. EPA (Davis *et al.*, 2005). O modelo estima as emissões veiculares para veículos de passeio, motocicletas, caminhões e ônibus, a partir: (i) da tecnologia dos veículos e distribuição de veículos na frota, considerando dados de manutenção; (ii) do comportamento dos motoristas em diferentes tipos de vias; e (iii) dos fatores médios de emissão para cada tipo de veículo.

**Modelo MODEM** – O MODEM é um *software* que permite calcular as emissões de poluentes atmosféricos gerados pela atividade veicular em áreas urbanas (TRL, 1999). Este cálculo é realizado com alto grau de interação entre modelos de transporte terrestre e sistemas de

informações geográficas (SIG). A metodologia de cálculo considera as emissões provenientes de três fontes: as derivadas de motores em condições estabilizadas, em partidas a frio e as denominadas evaporativas. As emissões totais são representadas pela soma dos três tipos de emissões.

**Modelo ARTEMIS** – O projeto Artemis (*Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems*) abrange laboratórios que estudam as emissões de poluentes veiculares de vários países europeus, como Inglaterra, Alemanha, Áustria, Dinamarca, França, Suécia, Suíça, Finlândia, Itália, Hungria, Grécia, Polônia, Bélgica e Holanda, e Israel. O projeto foi criado para desenvolver um modelo de emissão harmônico para o transporte rodoviário, ferroviário, aeroviário e hidroviário (Artemis, 2007). O cálculo de emissões requer situações específicas de entrada no modelo, descrevendo as características do tráfego, em uma situação particular ou em um ponto específico.

**Modelo VT-Micro** – O modelo de emissões VT-Micro desenvolvido na Virginia Tech, EUA, é integrado ao modelo de tráfego INTEGRATION (Ahn *et al.*, 2002). O VT-Micro é um modelo estatístico instantâneo que estima CO, HC e NO<sub>x</sub>. O modelo é constituído por regressões lineares, desenvolvidas a partir de uma base de dados derivada de testes realizados em oito veículos no *Oak Ridge National Laboratory*.

**Modelo CMEM** – O CMEM (*Comprehensive Modal Emissions Model*) é um modelo de emissão modal físico, baseado na demanda por potência, desenvolvido na Universidade da Califórnia em Riverside e na Universidade de Michigan (Barth *et al.*, 2000) patrocinado pelo *National Cooperative Research Project*. O modelo estima as emissões de CO, HC, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> a cada segundo, além do consumo de combustíveis em função do modo de operação de automóveis e veículos comerciais leves.

## 2.4 Combustível

O combustível utilizado nos motores ciclo Diesel é o óleo que leva o mesmo nome deste tipo de motor. O óleo Diesel é mais viscoso que a gasolina, e esta propriedade é essencial, considerando que através da viscosidade se garante a lubrificação adequada dos componentes do sistema de combustível que opera sob altas pressões e se obtém a pulverização na câmara de

combustão facilitando o contato das partículas de combustível com ar no processo de combustão. O óleo Diesel está classificado numa faixa intermediária de densidade superior ao querosene e inferior aos lubrificantes. Este tipo de combustível contém uma quantidade de parafina que em baixas temperaturas provoca problemas de fluidez do combustível principalmente através dos filtros. Para contornar isto alguns países fornecem óleo Diesel próprio para baixas temperaturas.

A combustibilidade de um combustível diz respeito a sua facilidade para realizar a combustão no motor de forma adequada. Em motores Diesel a combustibilidade relaciona-se principalmente ao poder calorífico e ao número de cetano do combustível. A viscosidade cinemática e a tensão superficial, pelo fato de definirem a qualidade de pulverização na injeção do combustível, participam também como fatores de qualidade da combustão (Parente, 2003).

O teor de enxofre e o teor de hidrocarbonetos aromáticos no combustível são características importantes inerentes aos impactos nas emissões. Em países de clima frio o ponto de fluidez torna-se também uma importante propriedade, sinalizando para a adição de aditivos anticongelantes (Parente, 2003).

#### **2.4.1 Propriedades físico-químicas dos combustíveis**

Serão apresentadas as propriedades físico-químicas mais importantes no que tange ao assunto em estudo:

**Destilação** – A destilação descreve o estágio final do processo de evaporação, quando do gotejamento de um líquido de um condensador para um recipiente de coleta. A curva de destilação do combustível é determinada pelo método descrito nas normas NBR 9619:2009 e ASTM D86:2009. A curva de destilação pode, de forma simplificada, ser representada por três pontos: T10, T50 e T90 (ou T85). Estes são, respectivamente, as temperaturas em que ocorre a vaporização de 10, 50 e 90% (ou 85%) do volume inicial do combustível, caracterizando a volatilidade das frações leves, médias e pesadas dos hidrocarbonetos presentes no combustível.

- Temperatura da destilação T10 é a temperatura na qual 10% do volume do produto é destilado. A análise da temperatura T10 visa controlar o teor de frações de leves de hidrocarbonetos. Esta temperatura tem influência na partida a frio e quente do motor, uma



vez que favorece o processo de atomização do combustível com o oxigênio (Keith e Coley, 1995).

- Temperatura da destilação T50 é a temperatura na qual 50% do volume do produto é destilado. O controle deste ponto da destilação contribui para um bom desempenho do motor durante a operação em regime permanente e nas retomadas de velocidade. As características dessa fração do combustível, têm influência direta na fase de aquecimento dos motores, pois a mesma está relacionada a facilidade de ignição (Keith e Coley, 1995).
- Temperatura da destilação T85 ou T90 é a temperatura na qual 85% ou 90% do volume do produto é destilado. A análise desta temperatura visa controlar o teor de frações pesadas no combustível Diesel com o objetivo de minimizar a formação de depósitos no motor, as emissões gasosas de hidrocarbonetos não queimados e óxidos de nitrogênio e a emissão de fumaça preta (Keith e Coley, 1995).

**Número de cetano** – O número de cetano indica a tendência à ignição de um combustível para motores Diesel e tem influência direta na partida a frio do motor e no seu funcionamento sob carga. Quanto maior for o número de cetano de um combustível, melhor será a combustão desse combustível em um motor Diesel. Combustíveis com alto teor de parafinas apresentam alto número de cetano, enquanto produtos ricos em hidrocarbonetos aromáticos apresentam baixo número de cetano. Na determinação do número de cetano, o desempenho do óleo Diesel é comparado com o desempenho de uma mistura do cetano com o  $\alpha$ -metilnaftaleno. O cetano (n-hexadecano –  $C_{16}H_{34}$ ) é um produto parafínico ao qual é atribuído um número de cetano igual a 100. O  $\alpha$ -metilnaftaleno ( $C_{10}H_7CH_3$ ) é um produto aromático ao qual é atribuído um número de cetano igual a zero. Pode-se dizer que se o óleo Diesel apresenta um número de cetano igual a 45, seu uso no motor atinge o mesmo desempenho (mesmo ângulo de atraso de ignição) que aquele apresentado por uma mistura de 45% de cetano com 55%  $\alpha$ -metilnaftaleno (Petrobras, 2000).

Fisicamente o número de cetano se relaciona diretamente com o atraso da ignição do combustível no motor. Valores baixos do número de cetano acarretam dificuldade de partida a frio, marcha lenta irregular, vibrações ou batidas no motor, e formação de depósitos de carbono nos pistões (Petrobras, 2000).

**Viscosidade a 40 °C** – A viscosidade é uma medida da resistência oferecida pelo fluido ao escoamento. Valores de viscosidade abaixo da faixa recomendada podem levar ao desgaste

excessivo nas partes lubrificadas do sistema de injeção, vazamento na bomba de combustível e danos ao pistão do motor. Valores de viscosidade superiores à faixa indicada ocasionam um aumento do trabalho da bomba de combustível, que operará forçada e com maior desgaste. Outros efeitos devido à elevação da viscosidade do combustível são a má atomização, a combustão incompleta e o aumento da fumaça emitida na exaustão do veículo. A viscosidade é determinada pelos métodos descritos nas normas ASTM D 445 e NBR 10441.

A maior razão para que óleos vegetais e gorduras animais devam ser convertidos em alquil ésteres (BioDiesel) é a viscosidade cinemática, buscando aproximá-la daquela do óleo Diesel do petróleo.

**Ponto de entupimento de filtro a frio** – O ponto de entupimento de filtro a frio (CFPP – *Cold Filter Plugging Point*) é definido como a menor temperatura na qual o combustível, quando resfriado sob condições controladas, não escoará ou necessitará de um tempo superior a 60s para escoar a quantidade de 20 ml através de um filtro ou, ainda, não retorna completamente para o frasco de teste. Na prática, o CFPP representa a temperatura ambiente na qual o óleo Diesel começa a causar entupimento de filtros e dificuldade de bombeamento e de atomização para queima da mistura ar-combustível na câmara de combustão. O CFPP é determinado pelo método descrito nas normas ASTM D 6371 e NBR 14747 (Petrobras, 2000).

**Ponto de fulgor** – O ponto de fulgor é a menor temperatura na qual o combustível gera uma quantidade de vapores que se inflamam quando se dá a aplicação de uma chama sob condições controladas. Esta característica do óleo Diesel está ligada à sua inflamabilidade e serve como indicativo dos cuidados a serem tomados com o produto. É determinado pelos métodos previstos nas normas ASTM D93 e ISO2719 (Petrobras, 2000).

Uma propriedade básica que distingue o óleo Diesel brasileiro dos seus semelhantes internacionais é o baixo ponto de fulgor em consequência da adição de naftas com a finalidade de estender a partida a frio do motor.

**Ponto de névoa e ponto de fluidez** – O ponto de névoa é a temperatura na qual o líquido, submetido à refrigeração começa a ficar turvo. O ponto de fluidez é a temperatura na qual o líquido não mais escoar livremente. Estas propriedades são consideradas importantes no que diz respeito à temperatura ambiente sob a qual o combustível deve ser armazenado e utilizado. A partir do ponto de névoa a fluidez do combustível se reduz, a perda de carga nos filtros do

sistema de alimentação aumenta e alteram-se a forma e as dimensões das gotas na saída do bico injetor. Conseqüentemente ocorre redução do desempenho do motor e aumento da emissão de material particulado. O ponto de névoa é determinado pelas normas ASTM D2500 e ABNT 11347. O ponto de fluidez é determinado pelas normas ASTM D97 e ABNT NBR 11349 (Petrobras, 2000).

Valores de ponto de névoa superiores à temperatura ambiente conduzem a maiores dificuldades de partida e a perdas rendimento do motor devido a obstrução do sistema pela parafina. Tanto o ponto de fluidez como o ponto de névoa do BioDiesel variam segundo a matéria-prima que lhe deu origem, e ainda, à do álcool utilizado na reação de transesterificação.

**Poder calorífico** – O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor despreendida durante a sua combustão estequiométrica. Caso a água gerada como produto da combustão se encontre na fase vapor, a quantidade de calor liberada no processo é denominada poder calorífico inferior (PCI). Se a água formada na combustão é totalmente condensada para a fase líquida, a energia liberada pelo combustível é chamada poder calorífico superior (PCS). A diferença entre o PCS e o PCI é a entalpia de vaporização da água formada no processo de combustão (Garcia, 2002).

**Ponto de anilina** – É a menor temperatura em que um determinado volume de Diesel é completamente miscível em igual volume de anilina (anilina é uma substancia utilizada para fabricação de corantes e é obtida do benzeno). O ponto de anilina é utilizado para verificação de conteúdo parafínico do Diesel, pelo método ASTM D611 e ABNT MB 229. O ponto anilina então é uma indicação de temperatura.

**Inflamabilidade** – É uma característica fundamental para o óleo Diesel, pois ele deve auto inflamar-se facilmente e com grande rapidez quando entra em contato com o ar comprimido no cilindro do motor. Como o tempo que decorre entre início de injeção e a inflamação da mistura (atraso de ignição) tem grande influencia no rendimento e na suavidade de funcionamento do motor, é necessário que o óleo Diesel possua um elevado grau de inflamabilidade.

#### 2.4.2 BioDiesel

A utilização de BioDiesel como combustível vem apresentando um potencial promissor no

mundo inteiro, sendo um mercado que cresce aceleradamente devido, em primeiro lugar, à sua enorme contribuição ao meio ambiente, com a redução qualitativa e quantitativa dos níveis de poluição ambiental, principalmente nos grandes centros urbanos. Em segundo lugar, como fonte estratégica de energia renovável em substituição ao óleo Diesel e outros derivados do petróleo. Assim, países como França, Áustria, Alemanha, Bélgica, Reino Unido, Itália, Holanda, Finlândia, Estados Unidos, Japão e Suécia vêm investindo significativamente na produção e viabilização comercial do BioDiesel.

O BioDiesel é um combustível renovável, biodegradável e ecologicamente correto. É constituído por uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos por reação de transesterificação de qualquer triglicerídeo de cadeia longa na presença de um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol), respectivamente.

O BioDiesel é miscível com o óleo Diesel de petróleo em qualquer proporção. Em muitos países, inclusive no Brasil, esta propriedade levou ao uso de misturas binárias Diesel/BioDiesel, ao invés do BioDiesel puro. Neste sentido é importante salientar que estas misturas binárias não podem ser caracterizadas como BioDiesel. As misturas deste tipo são designadas por acrônimos como B20, que representa a mistura de 20% de BioDiesel no óleo Diesel de petróleo.

A justificativa para o BioDiesel ser utilizado como um combustível alternativo ao óleo Diesel é a similaridade do número de cetano e das propriedades físico-químicas, como o calor de combustão, o ponto de fluidez, a viscosidade cinemática, a estabilidade à oxidação e a lubricidade.

**O BioDiesel no Brasil** – Em termos regionais, no Brasil há grande diversidade de opções para produção de BioDiesel. Na Figura 21 está apresentada a atual distribuição das oleaginosas nas regiões do Brasil.

A partir de primeiro de janeiro de 2010, passou a ser obrigatória a mistura de 5% de BioDiesel em todo óleo Diesel consumido no Brasil, exceto óleo Diesel marítimo. A mistura B5 ajudará a reduzir em 3% a emissão de CO<sub>2</sub> da queima do combustível, além de reduzir a emissão de material particulado, segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A entidade também afirma que será possível uma economia de US\$ 1,4 bilhão/ano devido à redução das importações de Diesel e que a ação antecipa em três anos a meta inicial da ANP.



Figura 21 – Matérias-primas utilizadas nas regiões do Brasil (Suarez, 2009).

A avaliação do uso de outros percentuais (e.g. B10, B20, B50... B100) é importante também para o uso em frotas cativas e para subsidiar decisões referentes à ampliação do uso do BioDiesel no país.

**O BioDiesel na Europa** – Nos últimos vinte anos há um renovado e decisivo interesse sobre os biocombustíveis por uma razão de independência energética em relação ao petróleo e, também, para minimizar a poluição urbana. Os biocombustíveis têm ainda um custo de produção

elevado, mas sua utilização parece inexorável devido à necessidade de reduzir o efeito estufa e o consumo de petróleo, principalmente no setor de transporte.

O maior produtor e consumidor mundial de BioDiesel é a Alemanha, responsável por cerca de 42% da produção mundial. Na Alemanha 90% da matéria-prima utilizada para a produção de BioDiesel é o óleo de colza. A Tabela 5 apresenta as características do uso do BioDiesel em alguns países de UE.

Tabela 5 – Características do uso do BioDiesel em países da Europa (Suarez, 2009).

País	Tipo de biodiesel comercializado	Matéria-prima	Observações
Alemanha	Os postos possuem o B100 e o óleo diesel aditivado (B5)	Colza	. 1.800 postos de abastecimento . Maior produtor da Europa . Mais de 2,5 milhões de veículos aprovados para utilizar biodiesel . Menor custo em relação ao óleo diesel(-12%)
Itália	B100: utilizado para indústria e aquecimento residencial. B5 e B25: utilizados para transporte.	Colza e Girassol	. 17 produtores de biodiesel
França	. Diesel comercializado com 5% de biodiesel (> 50% do total). . Denominado de "Diester". . B30: grande utilização em frotas cativas.	Colza e Girassol	. 3 grandes produtores de biodiesel. . 13 refinarias no país, 7 misturam o B5 ao óleo diesel de petróleo. . 4.000 veículos utilizam o biodiesel em mistura (mais da metade com B30).

**O BioDiesel nos EUA** – Com o aumento da população e o crescimento da produção industrial nos EUA, a poluição (aérea, aquática e terrestre) passou a constituir uma preocupação crescente. A concessão de autorizações para a construção de novas refinarias de petróleo tornou-se cada vez mais difícil e o custo das refinarias bastante variável.

No final da década de 1970 e no início da década de 1980, após a crise estabelecida pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e outros pesquisadores investigaram o uso de combustível de óleos vegetais. De uma forma geral, a conclusão naquela época foi a de que os óleos vegetais eram muito viscosos para serem utilizados por longos períodos em motores Diesel modernos.

Atualmente a situação dos EUA é a mais grave do mundo nos que diz respeito aos biocombustíveis. Nem o etanol nem o BioDiesel poderiam substituir em larga escala o petróleo sem impacto no suprimento de alimentos. Se toda a produção de soja for dedicada ao BioDiesel, este substituiria apenas 6% da demanda norte-americana de óleo Diesel. No presente os EUA utilizam menos de 1% de BioDiesel para atender a sua demanda por óleo Diesel.

Não há mistura obrigatória de BioDiesel ao óleo Diesel nos EUA, embora tramite no senado norte-americano uma legislação prevendo um mandato federal de adição de 2% de BioDiesel de imediato, aumentando a mistura para 5% na próxima década. As misturas mais populares nos EUA são B2, B10, B11 e B20, sendo esta última a mais comercializada (70%).

**Características do BioDiesel** – Vários estudos têm demonstrado que as características do BioDiesel são muito próximas às do óleo Diesel. Pelas semelhanças de propriedades fluidodinâmicas e termodinâmicas, o BioDiesel e o óleo Diesel do petróleo possuem características equivalentes, especialmente sob os aspectos da combustibilidade em motores do ciclo Diesel. Knothe *et al.* (2006) salientam que a propriedade do combustível que melhor demonstra esta compatibilidade é o número de cetano. Além da qualidade de ignição expressa pelo número de cetano, muitas outras propriedades são igualmente importantes para demonstrar a adequação do BioDiesel como combustível alternativo. O calor de combustão, o ponto de fluidez, a viscosidade cinemática, a estabilidade à oxidação e a lubricidade estão entre as propriedades mais importantes. Portanto, o desempenho e o consumo de combustível são praticamente equivalentes, sem que haja necessidade de grandes adequações dos motores para funcionar regularmente com óleo Diesel de petróleo ou BioDiesel.

**Pontos Críticos para o uso do BioDiesel** – O BioDiesel possui muitas vantagens em relação ao Diesel, mas existem alguns pontos que devem ser levados em consideração. Apesar das propriedades do BioDiesel e do Diesel ser bastante similares isso ainda não torna possível o uso do BioDiesel na sua forma pura. O BioDiesel puro apresenta densidade maior que a do Diesel o que ocasiona desgastes prematuros em bombas injetoras, devido ao aumento da pressão de injeção. A viscosidade mais alta do BioDiesel provoca mal funcionamento do motor em baixas temperaturas, desgastando os sistemas mecânicos.

**Considerações Técnicas sobre o BioDiesel e os Sistemas Eletrônicos** – Controles mais precisos e pressões de injeção mais altas dos novos sistemas controlados eletronicamente

possibilitam uma combustão mais eficiente. Para o uso destes sistemas com BioDiesel puro ou com altas porcentagens misturadas ao Diesel, deve-se pensar em funções de *software* e sensores que tratem as diferentes propriedades e características destas misturas e/ou combustíveis.

**Efeitos do uso do BioDiesel nas Emissões de Poluentes** – Sob leis mais rígidas é necessário considerar no futuro a variação nas emissões de poluentes causadas pelo uso de combustíveis alternativos, que não necessariamente reduzem as emissões de todos os poluentes simultaneamente. Vários trabalhos publicados mostram que a utilização de BioDiesel aumenta a emissão de  $\text{NO}_x$  e diminui a de outros poluentes. Assim, é de esperar que caso não se leve em consideração a calibração do motor para uma determinada mistura de BioDiesel, corre-se o risco de não se atingir os limites de  $\text{NO}_x$  para o seu uso em maiores porcentagens.

Em todas as condições de ensaios consideradas em seus experimentos, as emissões de  $\text{NO}_x$  crescem usando um B100, exceto na marcha lenta (Kegl, 2008a). A maior formação de  $\text{NO}_x$  é uma consequência do avanço de injeção inapropriado, pois devido ao fato do biocombustível possuir um maior conteúdo de oxigênio, que acaba por reagir com o nitrogênio do ar circundante. Por outro lado, os níveis de fumaça, as emissões de CO e HC não queimados são reduzidos pois o maior teor de oxigênio auxilia na oxidação dos produtos da combustão no interior do cilindro.

Na Figura 22 pode-se observar os dados de emissões de  $\text{NO}_x$ , PM, CO e HC para o BioDiesel aplicado em motores de veículos pesados publicados pela EPA. Fica claro que ocorre uma substancial redução nas emissões de MP, CO e HC com o uso do BioDiesel. Além disso, os dados mostram um aumento nas emissões de  $\text{NO}_x$ .



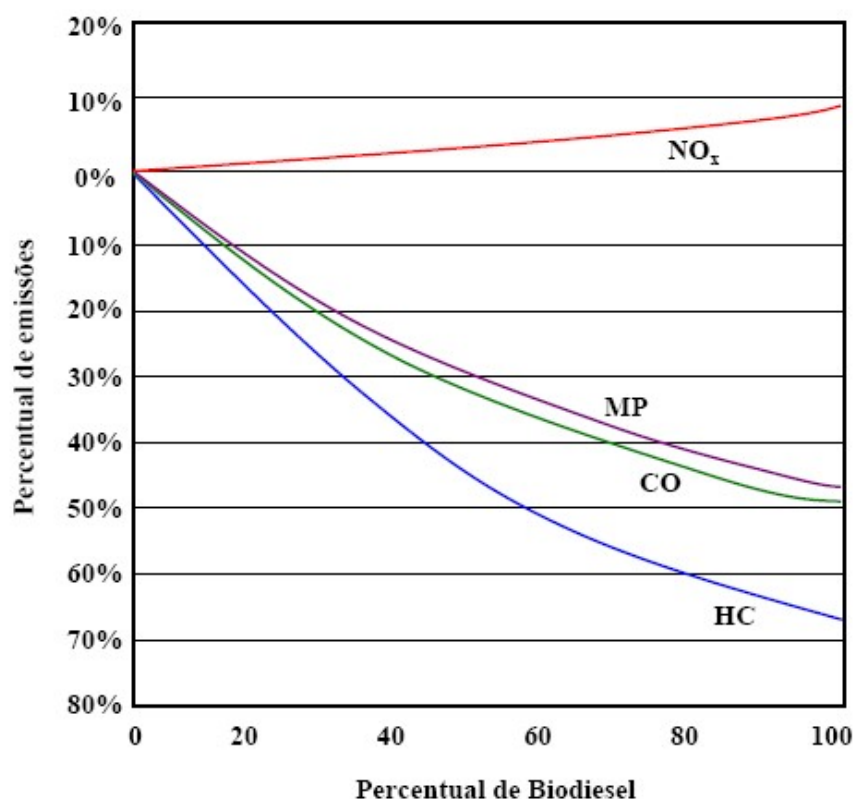


Figura 22 – Evolução dos efeitos do BioDiesel na emissão de poluentes em motores Diesel para veículos pesados (Labeckas e Slavinskis, 2006).

O aumento da emissão de  $\text{NO}_x$ , em especial nos grandes centros urbanos, assume relevante preocupação pelo fato de ser o  $\text{NO}_x$  um dos precursores do ozônio, considerado um poluente atmosférico secundário associado aos problemas de qualidade do ar. Os óxidos de nitrogênio e os hidrocarbonetos são os precursores da formação do ozônio na troposfera. Entretanto, alguns estudos têm revelado que o fator fundamental para a formação do ozônio é a relação entre a concentração desses dois poluentes.

## 2.5 Óleo lubrificante

### Qualidades essenciais dos óleos lubrificantes

São cinco as funções e qualidades essenciais dos óleos lubrificantes:

**Reduzir a resistência por fricção** – Durante o arranque a frio a viscosidade do óleo não deve ser muito elevada para facilitar o bombeamento e evitar resistência indevida na partida. Por

outro lado, deve ser suficientemente elevada para proporcionar uma boa lubrificação entre os anéis e os cilindros, especialmente no ponto morto superior do pistão.

**Proteger contra a corrosão e desgaste** – Durante as paradas ou em funcionamento a baixa temperatura, o lubrificante deve proteger as superfícies metálicas contra a ação corrosiva dos produtos provenientes da queima dos combustíveis (água,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ), como também ter boa resistência à oxidação e estabilidade térmica.

**Ajudar na vedação** – Na zona dos anéis, especialmente no ponto morto superior, o óleo deve ter viscosidade suficiente a altas temperaturas e baixa volatilidade. Deve contribuir para manter reduzido o desgaste e evitar a formação de depósitos nas ranhuras dos anéis.

**Contribuir para o esfriamento** – A capacidade do lubrificante de trocar calor é uma característica importante, principalmente na área dos pistões e dos mancais. Para um bom desempenho, o óleo deve possuir excelente estabilidade térmica, baixa volatilidade e boa resistência à oxidação.

**Facilitar a eliminação de produtos indesejáveis** – O lubrificante deve ter boa ação dispersante, capaz de manter em suspensão a poeira, fuligem, resíduos de desgaste, produtos orgânicos oxidados provenientes da queima incompleta do combustível e outros agentes poluidores, que provocam a formação de depósitos e aceleram o desgaste. Durante a drenagem o óleo deve eliminar todo esse material.

## 2.6 Líquido de Arrefecimento

O líquido de arrefecimento deve apresentar algumas propriedades para que seja adequado ao uso em motores de combustão interna. A concentração do líquido anticongelante misturado à água deve prover adequada diminuição do ponto de congelamento do líquido de arrefecimento de modo a promover a partida a frio do motor em condições adequadas, bem como proteger contra corrosão e aumentar o ponto de ebulição do líquido de arrefecimento.

A água é o constituinte mais comum do líquido de arrefecimento devido à sua habilidade de transferir calor e por poder ser facilmente obtida. No entanto, os seus pontos de ebulição e solidificação limitam sua utilidade quando aplicada sozinha como um arrefecedor. Algumas impurezas naturais da água podem acelerar a corrosão dos componentes do motor por onde ela

circula, além de reduzir a transferência de calor devido à formação de incrustações, particularmente em regiões mais quentes (SAE J814, 1999).

Quando a água congela na forma de gelo, ela expande cerca de 9% em volume. Se a água é congelada dentro do sistema de arrefecimento do motor, a pressão resultante pode causar sérios danos, então uma solução anticongelante é adicionada à água (SAE J814, 1999).

### **Anticongelante**

Com a quantidade adequada de solução anticongelante, a água poderá circular livremente em todo o sistema de arrefecimento mesmo sob temperaturas bem abaixo do ponto de congelamento da água pura, o que favorece a partida e operação do motor a baixas temperaturas. O ponto de congelamento é definido como a temperatura em que a cristalização do gelo se inicia ou a máxima temperatura encontrada imediatamente após o início da formação de cristais de gelo. A ASTM possui um método para determinação do ponto de congelamento através do uso de um refratômetro (ASTM D 3321).

A solução anticongelante mais comumente utilizada é o etileno glicol. A mistura do etileno glicol + água apresenta maior ponto de ebulição, menor ponto de congelamento e características de troca térmica ligeiramente melhores do que a água pura (Tabelas 6 e 7):

Tabela 6 – Pontos de congelamento e ebulição de uma solução anticongelante (SAE J814, 1999).

<b>Volume de anticongelante misturado à água</b>	<b>Solução de Etileno Glicol</b>	
	<b>Ponto de congelamento (°C)</b>	<b>Ponto de ebulição (°C)</b>
40%	-24	106
50%	-37	108
60%	-52	111
70%	-64	114

Tabela 7 – Características de troca de calor a 99°C (210°F) (SAE J814, 1999).

Volume de anticongelante misturado à água	Solução de Etileno Glicol		
	Viscosidade (mPa·s)	Calor Específico (kJ/(kg·K))	Condutividade térmica (W/m·K)
0%	0,29	4,228	0,0562
40%	0,59	3,768	0,0375
60%	0,81	3,475	0,0302

Outras soluções anticongelantes também são utilizadas como o propileno glicol, glicóis pré-diluídos em água deionizada e outros para aplicações especiais. Diferentes tipos de anticongelantes não devem ser misturados.

Uma concentração maior que 68% de etileno glicol no líquido de arrefecimento reduz a proteção de congelamento. A máxima concentração recomendada é 60% que provê proteção de congelamento de -52 °C. O líquido de arrefecimento com 50% de etileno glicol tem proteção térmica para -37 °C. A Figura 23 apresenta o comportamento da proporção de uma solução anticongelante comercial com água em função da temperatura.

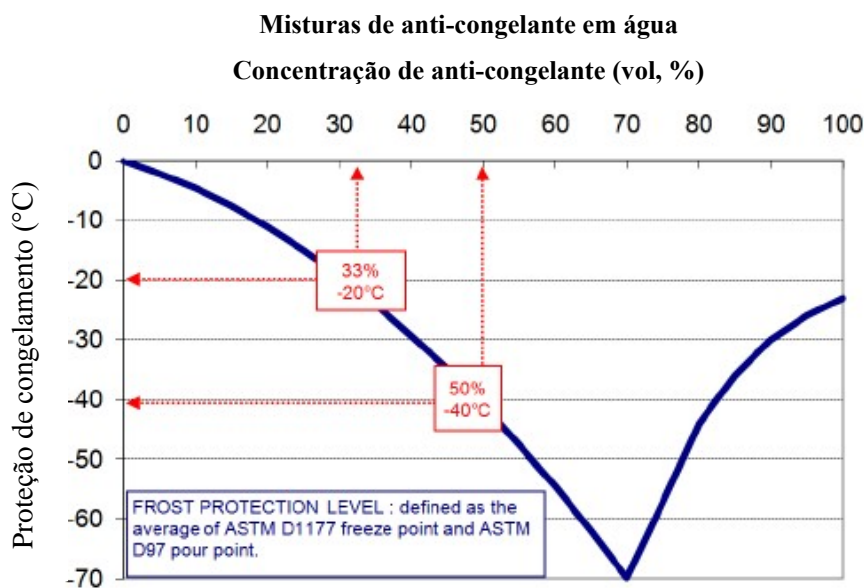


Figura 23 – Ponto de congelamento considerando um anticongelante da marca Havoline.

## **2.7 Sistema de Partida**

Um sistema de partida completo é composto de bateria, motor de partida e motor de combustão. A capacidade de partida do motor considera os seguintes parâmetros (Gardner e Henein, 1988):

- Tempo de arranque necessário;
- Tempo que o motor de partida fica ligado para a combustão poder iniciar;
- Torque de arranque e medições de fumaça;
- Tempo para o motor de combustão ir para a velocidade de marcha lenta.

Motores de combustão interna não são capazes de partir sozinhos como, por exemplo, os motores elétricos. Para a partida de um motor de combustão é necessário um torque inicial, produzido por um motor elétrico, chamado motor de partida, e a energia para este processo é recebida de uma bateria.

Durante o arranque o motor de combustão deve ser visto como uma carga para o motor de partida. Motores com maior taxa de compressão, como é o caso dos motores Diesel, precisam de maior potência no instante da partida. A velocidade de arranque é menor durante o estágio de compressão e isto limita a capacidade do sistema de partida.

O torque útil (durante o arranque este é o torque que o motor de partida tem que produzir) é a soma da força da pressão do gás, torque de inércia (de todas as partes móveis) e o torque de atrito (todas as perdas mecânicas). O torque de atrito é altamente dependente do óleo lubrificante e da temperatura do motor.

### **2.7.1 Motor de Partida**

É necessário que o motor de partida faça o motor de combustão girar com uma rotação mínima e, após as primeiras combustões e consequente aumento da rotação, seja alcançado o regime mínimo de marcha autônoma não sendo mais necessário o auxílio do motor de partida, que é então desligado.

O motor de partida é um dispositivo que opera apenas por alguns segundos, transformando energia elétrica da bateria em torque mecânico para iniciar o movimento do motor Diesel,

permanecendo desligado no período restante. Durante a partida demanda correntes elevadas, sendo o principal consumidor de energia a ser considerado no dimensionamento da bateria.

Os veículos estão cada vez mais equipados com dispositivos eletrônicos, tanto para proporcionar mais conforto para os condutores, como para os sistemas de controle do motor e de todo o veículo. Estes equipamentos consomem energia e muitos são utilizados simultaneamente. Eles demandam capacidade da bateria e limitam a energia disponível para a partida. Com isto, é importante diminuir a potência necessária para a partida do motor.

Para evitar o superaquecimento do motor de partida, o período de arranque não deve exceder 60 segundos, a menos que termopares estejam medindo e verificando que a temperatura do motor de partida permanece em um nível aceitável. Se a partida não for bem sucedida, deve-se esperar alguns instantes antes de uma segunda tentativa.

### **2.7.2 Bateria**

Baterias de chumbo-ácido são as mais utilizadas no armazenamento de energia elétrica em veículos. Apresentam diversas vantagens (Reasbeck e Smith, 1997):

- A capacidade de fornecer altos valores de corrente necessárias para a partida do veículo de um modo confiável;
- É de fabricação barata e utiliza materiais de baixo custo, proporcionando um preço acessível;
- Comporta-se bem como limitador de tensão e tem boa vida útil;
- Os componentes químicos são estáveis dentro de uma larga faixa de temperaturas.

A maioria dos veículos pesados utiliza um sistema elétrico de 24 V com duas baterias de 12 V. Os caminhões em geral possuem três diferentes capacidades de bateria, com uma delas considerada padrão, outra que é utilizada em países mais quentes onde é comum a aplicação de baterias com capacidade um pouco menor, e em países frios é utilizada uma bateria de maior capacidade. Isto ocorre porque a resistência interna da bateria aumenta em baixas temperaturas, além do consumo ser maior em função do maior torque de partida e da aplicação de aquecedores no motor, que são alimentados pela bateria (velas aquecedoras, aquecedores do ar de admissão e do combustível).

Uma bateria chumbo-ácido de 12 V é composta por seis células idênticas conectadas em série. Estas células são compostas por três componentes ativos; placa positiva, placa negativa e um eletrólito. As placas são imersas no eletrólito.

A capacidade da bateria depende da área e da espessura das placas no eletrólito. Quando não há corrente fluindo pela bateria, ela está em equilíbrio e um valor de tensão de circuito aberto é observado em seus terminais. Quando a corrente começa a fluir, um valor de tensão diferente é observado e esta mudança é conhecida como polarização.

A capacidade elétrica da bateria (Ampère-hora) define a corrente elétrica disponível por um período especificado. Quanto maior a quantidade de materiais ativos, maior será a capacidade. A reserva de capacidade (RC) é o tempo em minutos que uma bateria nova pode sustentar um consumo de 25 A a 27 °C no caso de uma falha do alternador.

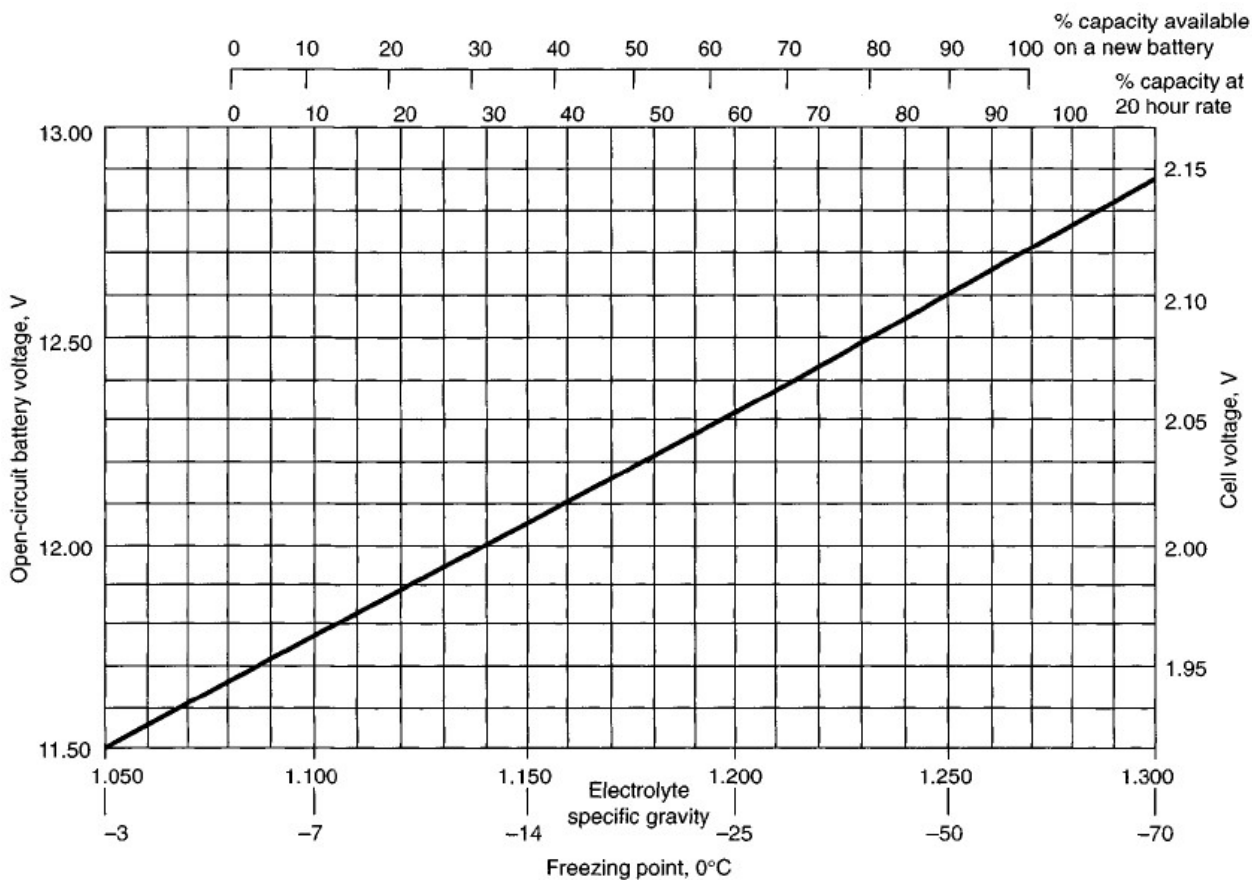


Figura 24 – Características de uma bateria de chumbo-ácido. Tensão de circuito aberto, gravidade específica, capacidade e ponto de congelamento usando eletrólitos de temperatura normal. Curvas relativas a 25 °C (Challen e Baranescu, 1999).

A corrente de arranque a frio (*cold-cranking amp* – CCA) é a corrente que a bateria pode fornecer por 30 s a  $-18^{\circ}\text{C}$  e ainda manter a tensão de 1,2 V por célula da bateria (7,2 V em uma bateria de 12 V). Repetidos consumos de bateria neste nível de tensão diminuirão a vida útil da bateria. Em geral, quanto maior a superfície dos eletrodos, maior será a corrente de arranque a frio.

Na maioria das aplicações, o sistema de partida do motor é integrado com outros sistemas elétricos. Um exemplo típico é um veículo em que a bateria provê energia para a iluminação, o ar condicionado, o ventilador do radiador e possivelmente para a operação de outros sistemas auxiliares. Algumas considerações especiais são necessárias se o motor se propõe a operar sob temperaturas muito baixas (Brunner e Ruf, 1959-1960).



### 3 PARTIDA A FRIO

Um motor Diesel deve ser capaz de partir de forma confiável e independente das condições climáticas. O mecanismo de partida adotado será influenciado significativamente pelo tipo e tamanho do motor, a finalidade pela qual é utilizada e as condições climáticas onde deve operar.

A partida em motores Diesel em baixas temperaturas apresenta um problema sério. Na falta de uma fonte artificial de ignição, muitos fatores contribuem para a obtenção de uma partida bem sucedida. O início da combustão do óleo Diesel é dependente da temperatura de compressão, pressão de compressão, tipo de combustível e característica da injeção do combustível. Durante o arranque, a temperatura do ar dentro do cilindro do motor é menor do que qualquer outra em diferentes modos de operação do motor. As baixas pressões e temperaturas de compressão são causadas em parte pela baixa temperatura ambiente, e principalmente pela excessiva perda de calor e as perdas por vazamento de gases de combustão entre o pistão e a parede do cilindro pelo cárter do motor (denominado *blowby*) a baixas velocidades de arranque. Isto resulta em uma baixa capacidade de ignição do combustível, e conseqüentemente em baixa capacidade de partida do motor a Diesel. Em resumo, a partida a frio de motores Diesel pode ser afetada por qualquer um dos seguintes parâmetros: propriedades do combustível; temperatura e pressão do ar de admissão; taxa de compressão; *blowby*; velocidade de arranque; injeção de combustível; projeto da câmara de combustão.

Melhorar a partida a frio de motores Diesel é uma das principais preocupações para projetistas de motor. Há para cada motor uma temperatura do ar ambiente mínima, abaixo da qual não ocorrerá a partida apenas com o aquecimento gerado durante a fase de compressão. Então antes de considerar o mecanismo de partida ou os dispositivos auxiliares para a partida, convém revisar resumidamente os fatores que influenciam a partida a frio de um motor (Brunner e Ruf, 1959-1960).

#### 3.1 Fatores que afetam a partida a frio

**Efeitos das propriedades do combustível na capacidade de partida a frio** – Parafinas de alta massa molar presentes no combustível se cristalizam a baixas temperaturas, formando uma cera suspensa na fase líquida. Esta massa pode interromper o fluxo de combustível devido ao entupimento dos filtros e ductos. Da mesma forma que as demais propriedades do combustível avaliadas a frio, a viscosidade também aumenta com o tamanho da cadeia e com o grau de saturação das moléculas. Viscosidades elevadas dificultam a admissão de combustível no tanque e sua vaporização na câmara de combustão. Quanto maior a viscosidade, maior a resistência ao escoamento e maior o tempo necessário para passagem do combustível pelo filtro.

Combustíveis com baixa qualidade de ignição afetam o desempenho durante a partida a frio. Aditivos que aumentam o número de cetano melhoram a capacidade de partida a frio porém dependendo do componente químico do aditivo, sua efetividade será limitada e abaixo de certas temperaturas o aditivo não tem efeito na partida a frio (Hara *et al.*, 1999). A influência do aumento do índice de cetano do combustível, por exemplo, de 50 para 60, é desprezível em termos de atraso de ignição comparado à influência da temperatura de compressão, enquanto um decréscimo no índice de cetano para 50 leva a um significativo acréscimo no atraso de ignição (Hardenberg e Hase, 1979). O efeito do índice de cetano é mais significativo na mínima temperatura de partida porque abaixo desta temperatura o motor estaria inoperável. Uma diminuição no índice de cetano de 45 para 40 aumentaria a mínima temperatura de partida de motores para veículos leves e pesados em cerca de 3 °C (Clerc, 1986).

**Efeito da velocidade de arranque na capacidade de partida a frio** – A velocidade de arranque age sobre a pressão e temperatura de compressão de forma importante, especialmente a baixas velocidades (abaixo de 200 rpm). Um aumento de 100 para 200 rpm causa um aumento de cerca de 70 °C na temperatura de compressão (Austen e Lyn 1959-1960), o que configura a velocidade de arranque como sendo o mais efetivo meio de se obter altas temperaturas de compressão sob condições de partida a frio. De acordo com Phatak e Nakamura (1983), em maiores velocidades de arranque, o gasto de tempo para reações de autoignição em grande parte excede qualquer ganho marginal em picos de pressão e temperatura por conta do reduzido *blowby* e transferência de calor. Toda vez que as condições de partida a frio são favoráveis, a velocidade de arranque não é um problema. Existe, porém uma velocidade de arranque mínima, abaixo da qual o motor não partiria. Este valor varia de motor para motor e é dependente de muitas

variáveis de projeto. Baixas velocidades de arranque exigem maior tempo para a ignição ser estabelecida, os picos de pressões e temperaturas são muito reduzidos, e são causados pela grande duração para *blowby* e transferência de calor. A situação é pior em motores com câmara dividida, uma vez que o ar passa por uma entrada fria com alta velocidade antes do combustível ser injetado. A velocidade causa uma pequena queda de pressão, mas uma grande queda de temperatura. A velocidade de partida não significa simplesmente a velocidade do motor; de maior importância é a velocidade durante o período de atraso de ignição. Por esta razão, é comum instalar um grande volante em motores Diesel.

Uma leve melhoria na capacidade de partida a altas velocidades de arranque, no entanto, sugere que uma vez que uma temperatura específica é obtida, algum acréscimo adicional em temperatura resulta da redução de *blowby* e do tempo disponível para reações de autoignição.

**Efeito da temperatura e pressão ambiente na capacidade de partida a frio** – Provavelmente o efeito da temperatura ambiente é o fator mais crítico que afeta a capacidade de partida do motor a Diesel: quanto menor a temperatura ambiente, menor a chance do motor partir. Com qualquer taxa de compressão adotada, o torque de partida solicitado aumenta com a redução na temperatura ambiente. Este aumento é devido principalmente ao aumento da viscosidade do óleo lubrificante a baixas temperaturas. Somado a isto, a expansão e contração diferencial de diferentes partes do motor poderia ser acrescentada ao atrito do motor. Sem levar em conta a taxa de compressão e a velocidade de arranque, a capacidade de partida é aumentada com a elevação das temperaturas. Se a temperatura do ar comprimido no momento da injeção do combustível estiver correta (para o combustível e a taxa de ar-combustível), aumenta a chance de partida, e outros parâmetros, como a velocidade de arranque e tempo de injeção, quase não têm efeito sob a capacidade de partida a frio.

É de se esperar que o motor frio gere fumaça branca. Sob certas condições e particularmente quando parte do combustível é injetado na câmara de combustão do motor frio, o combustível na forma líquida não evaporará em contato com a câmara até a fase de expansão. Esta parte do combustível não fará parte da combustão, e aparecerá na forma de fumaça branca após o motor partir.

**Efeito da injeção de combustível na capacidade de partida a frio** – Austen e Lyn (1959-1960) descobriram que um ajuste ótimo para operação normal é geralmente tão breve quanto para

uma ótima partida a frio, que se situa entre 10° e 20° BTDC (antes do ponto morto superior) pelo ajuste estático. Em velocidades de motor extremamente baixas, como durante a partida, por causa das altas perdas de calor e *blowby*, a temperatura de compressão é menor que aquela a maiores velocidades de motor. Então o tempo de atraso de ignição é mais longo durante a partida, mas o ângulo de acionamento do motor requerido para o atraso de ignição se torna muito menor. Então um retardo no tempo de injeção (comparado ao tempo ótimo de injeção para desempenho) resulta em uma boa partida.

Com o progresso da tecnologia de injeção de combustível, algumas estratégias de injeção foram desenvolvidas para melhorar a capacidade de partida a frio do motor Diesel e a emissão de gases de exaustão. Osuka *et al.* (1994) mostraram que a capacidade de partida foi substancialmente melhorada com o uso de injeções piloto. O tempo de partida foi reduzido a um terço e a fumaça branca durante a partida foi reduzida a um décimo em relação aos sistemas de injeção convencionais. Acredita-se que a injeção piloto produz uma reação de chama fria, que promove a ignição da injeção principal mais tarde.

**Efeito da taxa de compressão na capacidade de partida a frio** – A ignição de motores de injeção direta de combustível depende de alta pressão e temperatura. O combustível tem que evaporar e alcançar sua temperatura de combustão espontânea com margem suficiente para reduzir o atraso de ignição a um nível aceitável. A alta pressão faz com que as moléculas de ar e de combustível tenham maior contato, aumentando a chance de uma reação química. Em altas taxas de compressão, a temperatura e a pressão de compressão do motor são maiores, assim como a temperatura das paredes do cilindro (Tsunemoto *et al.*, 1986). Maiores pressões e temperaturas de compressão levam a atrasos de ignição mais curtos e redução da aderência de combustível às paredes do cilindro. Maiores taxas de compressão auxiliam a partida a frio do motor. Por esta razão uma taxa de compressão maior é desejável para partida a frio, mas compromete a economia de combustível, potência e emissão de gases. Altas taxas de compressão do motor requerem maior potência disponível da bateria para manter a velocidade de arranque desejada. Em motores a Diesel equipados com turbo, a taxa de compressão é frequentemente reduzida para limitar os picos de pressão. Isto tem um efeito prejudicial no desempenho de partida do motor.

**Efeito do projeto da câmara de combustão na capacidade de partida a frio** – Biddulph e Lyn (1966-1967) verificaram que o aumento da temperatura de compressão na partida de um

motor Diesel de injeção indireta era muito maior que o aumento da temperatura de compressão com motores de injeção direta. Eles concluíram que isto era uma consequência do maior nível de transferência de calor que ocorre em motores de injeção indireta, e o maior tempo disponível para transferência de calor em menores velocidades de arranque. Notaram também que para a autoignição ocorrer em motores Diesel, uma combinação de tempo e temperatura suficientes é necessária.

Tsunemoto *et al.* (1986) estudaram a influência do formato da câmara de combustão em um motor Diesel de injeção direta e a profundidade de aderência do combustível nas paredes da câmara mostraram que em câmaras de combustão rasas, a distância do bico injetor para as paredes da câmara é considerável, e o combustível evapora antes de chegar às paredes, reduzindo a quantidade de combustível restante. O trabalho de Phatak e Nakamura (1983) indicou que o projeto da câmara de combustão e o processo resultante da mistura ar-combustível tem uma significativa influência na capacidade de partida a frio de motores Diesel de injeção direta. Para obter tanto boa capacidade de partida a frio como desempenho, o projeto da câmara de combustão deve promover localmente uma taxa não uniforme de ar-combustível, mas com um padrão de pulverização do combustível bem organizado. Câmaras de combustão que promovem alta turbulência e expõem jatos de combustível não são desejáveis para uma boa capacidade de partida. Além disto, a aderência de combustível nas paredes da câmara não é desejável para uma boa capacidade de partida a frio. Independentemente do projeto da câmara de combustão, razão de injeção e geometria do injetor, a melhora da capacidade de partida a frio é obtida com o retardamento do momento da injeção.

**Efeito dos auxiliares de partida a frio** – Recursos auxiliares podem ser ajustados ao sistema de injeção: injeção de combustível em excesso, atraso no tempo de injeção, e furos extras no injetor de combustível. A injeção de combustível em excesso é benéfica por que o volume extra aumenta a taxa de compressão, qualquer combustível não queimado ajuda a selar os anéis do pistão e válvulas, e combustível adicional aumenta a probabilidade de ignição. No entanto é necessário impedir o excesso de injeção de combustível durante a operação normal, pois apesar do aumento da potência de saída, a fumaça seria inaceitável. Esta é uma condição indesejável e em alguns países até ilegal: no passado este era um artifício utilizado para aumentar a potência do motor em trechos de relevo acentuado que geravam uma nuvem densa de fumaça poluente.

Atraso no tempo de injeção significa que o combustível é injetado quando a pressão e temperatura são maiores. Em sistemas onde o combustível vaporizado adere na superfície da câmara de combustão isto é particularmente benéfico para auxiliar o bico injetor, de forma a orientar o *spray* vaporizado no ar.

Outro recurso auxiliar de partida é introduzir com o ar um líquido volátil, que pode produzir de imediato a autoignição. Éter é muito efetivo uma vez que queima sob uma ampla faixa de mistura; a autoignição ocorre com taxas de compressão menores que 3,8:1 e com menor temperatura (182 °C) do que o Diesel (385 °C). No entanto por questões de segurança esta técnica praticamente não é mais utilizada.

Outros recursos auxiliares de partida são as velas aquecedoras e os aquecedores (*heaters*) do ar de admissão, do líquido de arrefecimento, do óleo lubrificante e do combustível, sendo que os aquecedores do ar de admissão e as velas aquecedoras são os auxiliares de partida mais amplamente utilizados. Estes componentes constituem o principal foco deste estudo. Lindl e Schmitz (1999) resumiram os equipamentos de partida a frio para motores Diesel de injeção direta. Eles concluíram que as velas aquecedoras são mais adequadas para motores Diesel de menor capacidade volumétrica devido à limitada energia disponível. Para motores maiores ou em regiões muito frias, o aquecedor do ar de admissão é o único meio prático de obter uma partida a frio confiável. Em suma, como a temperatura de compressão é o fator mais importante para a partida a frio do motor, a vela aquecedora e o aquecedor do ar de admissão são os componentes mais efetivos e amplamente utilizados como auxiliares.

A aplicação dos outros tipos de aquecedores proporciona certamente condições mais favoráveis para que a partida não somente ocorra, mas que ocorra mais rapidamente. A velocidade de arranque tem efeito tanto negativo quanto positivo sobre o atraso de ignição. Altas velocidades de arranque reduzem *blowby* e transferência de calor resultando em alta pressão e temperatura de compressão, mas também reduzem o tempo disponível para a ignição acontecer.

O efeito do combustível acumulado na taxa de compressão e então na temperatura e pressão de compressão precisam ser analisados quantitativamente. A evaporação residual de combustível em ciclos de falha na ignição do motor tem um efeito no próximo ciclo de combustão. O aquecimento das paredes do cilindro durante o arranque e aceleração afetará a temperatura de compressão através do seu efeito na transferência de calor.

### 3.2 Pesquisas anteriores realizadas em partida a frio

Henein *et al.* (2001) descreveram que uma parte do combustível acumulado durante os ciclos em que não ocorre a queima seria queimado nos ciclos de queima subsequentes e causa altas pressões de gás no cilindro, além de ser expelido como fumaça branca. Falhas na combustão e instabilidade da combustão durante a partida a frio são os principais fatores que afetam as emissões de HC (hidrocarbonetos). Zahdeh *et al.* (1990) descreveram o ciclo padrão do fenômeno de queima e não queima de combustível durante a partida a frio de motores Diesel.

Yassine (1995) investigou o efeito das propriedades do combustível na instabilidade de combustão e emissões de fumaça branca durante a partida a frio. Dois tipos de combustível foram testados e ambos apresentaram instabilidade de combustão com repetibilidade. Com uma volatilidade relativamente alta, um dos combustíveis apresentou melhor capacidade de partida do que o outro, apesar de ter um número de cetano menor.

Han (2000) descreveu o tempo de injeção *versus* mapas de velocidade do motor obtidos em um motor Diesel de 4 cilindros com injeção direta em diferentes temperaturas ambiente baseado numa análise experimental detalhada ciclo a ciclo. Os mapas revelaram a existência de duas zonas: uma zona de queima e uma zona de não queima do combustível, divididas por uma linha de fronteira. A natureza do processo de queima e não queima durante a partida a frio transiente do motor Diesel foi também relatada por outros pesquisadores (Asou *et al.*, 1992; Kobayashi *et al.*, 1984; Osuka *et al.*, 1994; Phatak e Nakamura, 1983; Ueda *et al.*, 1999).

Liu (2001) desenvolveu um programa de simulação de partida a frio do motor Diesel de acordo com o progresso na formação de uma mistura inflamável de um ciclo para o próximo ciclo durante o período de arranque. Ele introduziu um índice de autoignição para determinar o ciclo da primeira queima de combustível. Este modelo foi aperfeiçoado por Zhong *et al.* (2003) para contar com os efeitos combinados da volatilidade do combustível e o seu número de cetano no período de arranque do motor durante a partida a frio. Porém nestes estudos uma hipótese feita era que o combustível evaporado é distribuído igualmente no cilindro. Esta hipótese não ocorre porque durante a partida a frio existem temperaturas e gradientes de vapor na câmara de combustão e existe a necessidade de se usar um modelo de combustão multizonas que leva em consideração os gradientes e a cinética das reações químicas de autoignição.

Zhong (2006) desenvolveu uma estratégia de controle melhor e validou experimentalmente em um motor Diesel de 4 cilindros sob temperaturas até -20°C e explicou algumas causas de falhas de partida a frio.

Payri *et al.* (2006) avaliou a aplicação dos aquecedores do ar de admissão em motores de pequeno porte em termos de viabilidade para partida a frio, emissões de HC e CO e redução do ruído de combustão durante a fase de aquecimento do motor.

Mitchell (1993) pesquisou o desempenho a frio de motores Diesel no Canadá. Ele verificou que as frotas que operavam em climas mais frios faziam uso de todos os auxiliares de partida como o aquecedor do bloco, do líquido de arrefecimento, do óleo do cárter ou estacionavam os veículos em garagens fechadas durante a noite. Em regiões mais temperadas, algumas frotas utilizavam os componentes auxiliares de partida mínimos necessários por serem suficientes. Além disso, os parâmetros importantes mencionados pelos condutores eram se o veículo partiu (especificamente se sustentou a marcha lenta), se foi ouvida alguma “batida” no motor e a quantidade de tempo em que produziu fumaça branca. Ele então mediu estes parâmetros em dezesseis motores Diesel com dezoito tipos de Diesel de diferentes composições, em testes conduzidos a -20 °C com componentes auxiliares de partida e a -5 °C sem componentes auxiliares. Os motores foram escolhidos para representar a diversidade de motores na América do Norte, Europa e Oriente (que são as regiões mais afetadas por baixas temperaturas). Os resultados mostraram que o tipo de motor e a sua calibração eram os principais fatores para controlar o desempenho a frio e o número de cetano constituía o mais importante parâmetro do combustível em condições frias.

Mann *et al.* (1999) conduziram um estudo para melhorar o entendimento das variáveis relevantes do combustível, utilizando uma matriz especial de combustíveis desenvolvida para permitir os efeitos do número de cetano, e da volatilidade inicial e final separadamente. Mostrou que o número de cetano era o parâmetro dominante do combustível que afeta o desempenho da partida a frio. Não foram detectados efeitos da volatilidade final, e os efeitos da volatilidade inicial foram relativamente pequenos e variavam em diferentes motores. Além disso, o desempenho com e sem compostos para aumentar o número de cetano foi testado. O combustível com número de cetano 50 foi efetivo em baixas temperaturas. Com o composto para aumentar o número de cetano até 55, houve uma significativa redução na emissão de hidrocarbonetos.



Liu *et al.* (2003) analisou o comportamento do *spray* de combustível antes e depois dele nebulizar nas paredes da câmara de combustão durante a operação de partida a frio. Sua análise mostrou que o combustível acumulado na câmara de combustão modifica a partida a frio através do aumento da pressão e temperatura de compressão e do aumento da concentração de vapor de combustível na câmara de combustão durante o período de atraso de ignição. A instabilidade de combustão do motor Diesel também foi analisada em detalhes e indicou que os ciclos de não queima após ciclos de queima são causados por um desbalanceamento entre a dinâmica do motor e a cinética da combustão.

Kegl (2008b) realizou análise numérica e experimental sobre a influência da temperatura do combustível no processo de injeção. Foi utilizado um motor Diesel com controle mecânico do sistema de alimentação. Os combustíveis utilizados foram o BioDiesel de canola e o óleo Diesel mineral. Os resultados experimentais demonstram que o consumo de combustível, a duração da injeção de combustível e a pressão de injeção aumentam com a queda da temperatura do combustível. Quando foi usado B100, a redução do volume de vapor, juntamente com a maior velocidade do som e o módulo de compressibilidade, levou a um menor atraso na injeção, especialmente sob baixas temperaturas. A distribuição do combustível B100 entre o conjunto de injetores tornou-se desigual em temperaturas compreendidas entre -3 °C (marcha lenta) e -7 °C (região de torque máximo). O autor sugere que o uso do B100 pode requerer o aquecimento do combustível de modo a evitar tais efeitos negativos.

Gabele *et al.* (1986) observaram que quando a temperatura ambiente diminui, as emissões de HC tendem a aumentar com combustíveis de menor qualidade, mas a emissão de particulados diminui. Com combustíveis de alta qualidade, emissões de HC tiveram um aumento muito pequeno ou nenhuma alteração em menores temperaturas ambiente.

Laurikko (1989; 1990) estudou o efeito da temperatura ambiente na emissão de HC sob condições de partida a frio. Verificou que assim que a temperatura ambiente cai, o HC e a emissão de fumaça branca aumentam.

### 3.3 Capacidade de Partida a frio sem auxílio

A temperatura do ar no cilindro do motor ao final da fase de compressão será a temperatura do ar no cilindro no início desta fase mais o aumento da temperatura promovido pela compressão. Este aumento dependerá do valor do **expoente do processo de compressão** e da **taxa de compressão** do motor.

O máximo aumento de temperatura do ar que pode teoricamente ocorrer durante a compressão é quando o processo é verdadeiramente adiabático. O expoente do processo de compressão terá então um valor de 1,41, que é a relação do calor específico do ar para uma pressão e volume constantes. Para alcançar este valor máximo teórico, a massa de ar contida no cilindro não deve mudar durante o processo de compressão e não deve ocorrer troca de calor entre este ar e qualquer parte do motor. Estas condições ideais não ocorrem em um motor real por que há inevitavelmente alguma perda do ar devido a vazamentos entre os anéis do pistão e possivelmente nas válvulas de admissão e escape. Há também perda de calor do ar com as paredes da câmara de combustão, o pistão e a parte superior do cilindro. Quanto maior estas perdas, maior é a redução do expoente do processo de compressão e menor o aumento da temperatura do ar no cilindro durante o estágio de compressão. As perdas serão máximas quando da partida de um motor frio e sua magnitude dependerá das seguintes características do motor:

**A relação curso/diâmetro (*stroke/bore ratio*)** – Para um cilindro com um dado volume de arraste, quanto menor a relação curso/diâmetro, maior o comprimento da circunferência do anel do pistão e então maior o potencial de vazamento de ar durante a fase de compressão. Também, a relação do volume pela área torna-se maior sobre a porção superior da fase de compressão, onde a maior parte da perda de calor do ar ocorre.

**A capacidade do cilindro** – A razão área/volume aumenta com a diminuição do volume de arraste do cilindro e então a perda de calor do ar será proporcionalmente maior com a diminuição da capacidade do cilindro.

**O tipo do sistema de combustão** – Um sistema de injeção direta estável tem menor razão de perda de calor do que um sistema de alta turbulência por conta do aumento do coeficiente de transferência de calor entre o ar e as superfícies frias da câmara de combustão. Semelhante a um sistema indireto ou uma pré-câmara de combustão que em geral possui uma área maior e induz

maiores velocidades do ar durante a fase de compressão, também terão uma maior taxa de perda de calor do ar do que um sistema de injeção direta.

Um aumento na taxa de compressão melhora a capacidade de partida a frio do motor sem auxílio, pela maior elevação da temperatura do ar durante a fase de compressão. Isto compensa algumas medidas para a redução do valor do expoente do processo de combustão, devido ao vazamento de ar e perda de calor para as partes frias. Deve-se notar, contudo, que o processo de combustão é um “ciclo misto” em que a combustão ocorre parcialmente em volume constante e parcialmente em pressão constante. Há então um significativo aumento na pressão do cilindro durante a combustão, e, a menos que o desempenho do motor e a eficiência térmica sejam prejudicadas, quanto maior a pressão de compressão maior será a máxima pressão do cilindro sobre uma dada pressão efetiva média.

A máxima pressão do cilindro que pode ser adotada sem prejudicar a confiabilidade e a durabilidade do motor depende do projeto de sua estrutura e seus componentes. A taxa de compressão adotada é, portanto um compromisso entre os requisitos de partida a frio sem auxílio e o atendimento de condições satisfatórias de operação sob máxima potência. De fato, em motores com turbo-compressor, para aumentar a razão de pressão de compressão, a necessidade de limitar a máxima pressão do cilindro para um nível aceitável algumas vezes resulta no uso de uma taxa de compressão que é menor para partida a frio sem auxílio.

A condição de taxa de compressão variável permitiria uma taxa maior a ser usada para a partida a frio e uma taxa menor para operação normal, mas em geral meios alternativos de garantir a capacidade de partida a frio são adotados.

A condição de partida a frio mais difícil que pode existir é quando toda a estrutura do motor, o líquido de arrefecimento e o óleo lubrificante adquirem a temperatura do ar ambiente – uma condição que é comum em motores pequenos para uma variedade de aplicações, incluído veículos de passeio, tratores e pequenas embarcações. Em clima temperado, uma temperatura ambiente mínima de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  pode ocorrer, enquanto que em regiões polares a temperatura deve cair abaixo de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Sob condições normais de operação, o ar para a combustão é aquecido na sua passagem pelo coletor de admissão; pelo turbocompressor; e pela superfície do cabeçote, câmara de combustão, pistão e superfície do cilindro, durante a entrada no cilindro. Consequentemente, a

temperatura deste ar no início da fase de compressão também estará nesta temperatura baixa. Soma-se a isto que o expoente do processo de compressão será muito reduzido sob estas condições, devido ao vazamento de ar e perda de calor. Isto significa que a capacidade de partida a frio de um motor sem auxílio pode ser melhorada pela criação de condições de partida que ajudem a aumentar o expoente dos processos de compressão. Esta abordagem pode ser aplicada a todos os motores Diesel, porém os métodos para obter este aumento variam com o tipo de motor e as limitações impostas por alguma aplicação em particular.

### **3.4 Aquecedores do motor**

Os auxiliares de partida possuem um amplo campo de aplicação para promover a combustão em um motor completamente frio exposto a uma temperatura ambiente baixa, mas o mais efetivo auxiliar de partida para estas condições adversas é a provisão de um ambiente artificial para o motor e seus acessórios, independentemente da condição climática. Além de prover condições de temperatura que sejam favoráveis ao início da combustão, ele auxilia para que sejam mantidas em níveis temperados a viscosidade do óleo lubrificante, a temperatura do líquido de arrefecimento e a temperatura de partida da bateria. Esta solução, entretanto, nem sempre é possível. Em países que normalmente experimentam condições de temperaturas polares, o pré-aquecimento é empregado em uma larga faixa de motores Diesel de modo a manter uma temperatura satisfatória durante o tempo em que o motor não está em operação (durante a noite, por exemplo) ou para pré aquecer o motor antes do momento da partida.

Quando a eletricidade está disponível, aquecedores elétricos auxiliares são frequentemente usados para manter a temperatura do bloco do motor, do óleo, das baterias em níveis elevados por maiores períodos de tempo. Ainda que este método auxilie a partida, o custo da eletricidade pode ser substancial por períodos longos; por esta razão, em conjunto com os aquecedores, utilizam-se termostatos que limitam o fornecimento de energia elétrica a manter a temperatura do bloco/líquido de arrefecimento e do óleo lubrificante uma temperatura suficiente para o motor consiga partir. Aplicações militares certamente não podem contar com este tipo de auxiliares pela ausência de suprimento de eletricidade, sendo esta solução limitada a ambientes urbanos fora dos casos de falta de energia.

As principais vantagens da utilização de aquecedores de resistência elétrica instalados no motor são o fato de serem compactos e convenientes. Em um motor com diversos aquecedores como o do bloco, líquido do arrefecimento e cárter é possível utilizar somente um cabo com uma tomada para todos eles. Isto é efetivo e satisfatório para regiões onde tomadas de eletricidade são disponíveis em áreas de estacionamento. Para veículos de maior porte, podem ser necessários outros tipos de aquecedores, uma vez que estes veículos podem se encontrar em áreas em que a energia elétrica é limitada ou indisponível. Nestes casos, aquecedores de propano são utilizados, com a desvantagem de que para temperaturas abaixo de  $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$  a pressão do gás é insuficiente para um funcionamento apropriado. Nestas temperaturas pode-se tentar utilizar um gás mais leve ou então manter o motor ligado.

Aquecedores montados externamente são disponibilizados e usados para aquecimento em áreas específicas e componentes como a bateria (manta térmica). Utilizam pouco espaço e são facilmente instalados.

A Tabela 8 apresenta a potência recomendada para aquecedores do bloco e do cárter em motores de 1,6 a 16 l de capacidade, para temperaturas de  $-18$  a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A Tabela 9 apresenta os tipos de aquecedores sugeridos e seu respectivo tamanho para temperaturas entre  $-35$  e  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Estas recomendações foram feitas pelo maior fornecedor de aquecedores automotivos (Diemand, 1991b).

Tabela 8 – Potências recomendadas de aquecedores do bloco e do cárter para diferentes tamanhos de motor.

<i>Cilindrada do motor (litros)</i>	<i>Potência recomendada para aquecedores a serem usados nas temperaturas relacionadas (W)</i>				
	<i>62,5 W/l a -18 °C</i>	<i>93,75 W/l a -23 °C</i>	<i>125 W/l a -29 °C</i>	<i>156,25 W/l a -34 °C</i>	<i>187,5 W/l a -40 °C</i>
	<b>Aquecedores de Imersão</b>				
<b>1,6</b>	100	150	200	250	300
<b>3,2</b>	200	300	400	500	600
<b>4,9</b>	300	450	600	750	900
<b>6,5</b>	400	600	800	1.000	1.200
<b>8,2</b>	500	750	1.000	1.250	1.500
<b>9,8</b>	600	900	1.200	1.500	1.800
<b>11,5</b>	700	1.050	1.400	1.750	2.100
<b>13,1</b>	800	1.200	1.600	2.000	2.400
<b>14,7</b>	900	1.350	1.800	2.250	2.700
<b>16,4</b>	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000

Nota: A máxima elevação de temperatura no motor será obtida em 5 horas de operação do aquecedor; aproximadamente 90% desta elevação levará cerca de 2 horas, e 75% após 1 hora.

Tabela 9 – Aquecedores recomendados para motores Diesel em temperaturas entre -35 e -50 °C.

<i>Auxiliar de partida</i>	<i>Motores de 2,4 l a 5,7 l</i>	<i>Motores até 9,0 l</i>	<i>Motores até 18,8 l</i>	<i>Motores industriais e fora de estrada</i>
<b>Aquecedor do Líquido de arrefecimento</b>	750 W (imersão)	1.500 W (imersão)	2.000 W (imersão)	2 × 2.500 W (tanque de combustível)
<b>Aquecedor do óleo do cárter</b>	150 W (imersão)	300 W (imersão)	450 W (imersão)	450 W (imersão)

Nota: Adicionalmente, um aquecedor da bateria é recomendado em todos os casos.

Uma vela aquecedora consiste em um elemento resistivo elétrico que se projeta na câmara de combustão. Geralmente, quando a vela aquecedora é energizada, ela se aquece até cerca de

1.000 °C e auxilia a ignição pelo aquecimento da câmara de combustão e da mistura ar-combustível.

A importância do aquecimento do ar de admissão é demonstrada na Figura 25, que mostra que para um dado decréscimo na temperatura do ar, o dobro desta queda é sentida pela câmara de combustão (Diemand, 1991b).

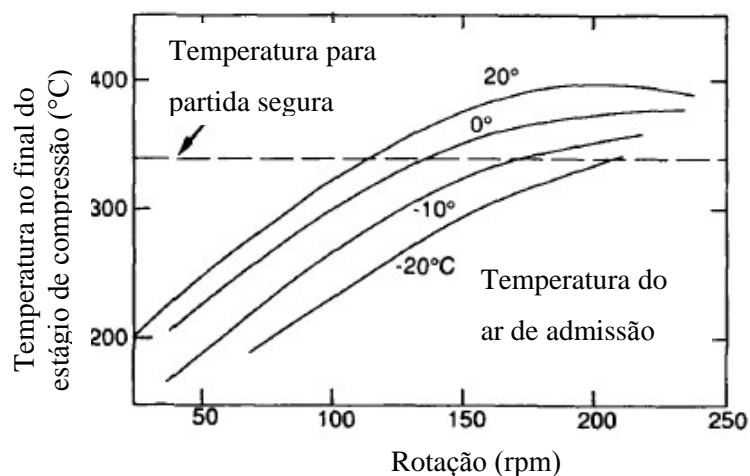


Figura 25 – Efeito da temperatura do ar de admissão e taxa de arranque ao final do estágio de compressão do motor Diesel. Claramente demonstra o valor do aumento da temperatura do ar de admissão (Diemand, 1991b).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Introdução

O início da pesquisa direcionou o estudo aos principais componentes e os parâmetros que são influenciados para a solução para os problemas de partida a frio e o aquecimento do motor a Diesel. A quantidade de calor requerido e o meio de aplicação não podem ser determinados de maneira simples, pois dependerão da temperatura ambiente, velocidade do ar, tamanho e tipo do motor. Para esta finalidade existem no mercado os componentes de auxílio para aquecimento do motor.

Os problemas devido às baixas temperaturas em veículos começam a aparecer em torno de 0 °C. O lubrificante fica mais viscoso, a bateria perde potência e a água presente no óleo, no combustível e em outros fluidos começa a causar problemas. Os motores que não são adequadamente preparados para a operação em climas frios (*winterized*) têm dificuldades de partir, e abaixo de -10 °C esta dificuldade aumenta e praticamente impede a partida. A solução para estes problemas é o aquecimento. A quantidade de calor requerido e os meios de aplicação não podem ser determinados de forma simples, uma vez que dependem da temperatura ambiente, da velocidade do vento, do tamanho e tipo de motor e o grau de preparação do motor para climas frios.

A velocidade do vento tem um considerável efeito na quantidade de calor necessário para aumentar a temperatura de um motor completamente frio a um nível em que consiga partir, e o seu efeito tanto na taxa de resfriamento do equipamento durante a operação e após o desligamento é significativo.

Na Figura 26 vê-se a perda de calor ( $W/m^2$ ) experimentada por um objeto aquecido, submetido a várias velocidades e temperaturas de vento. Enquanto o equipamento nunca pode ser resfriado abaixo da temperatura ambiente sem levar em consideração a velocidade do vento, o vento aumenta consideravelmente a taxa em que o resfriamento a esta temperatura ocorre. Desta



forma, o tamanho, tipo e quantidade de aquecedores requeridos pelo motor dependem de onde o veículo será estacionado quando não estiver em uso (Diemand, 1991b).

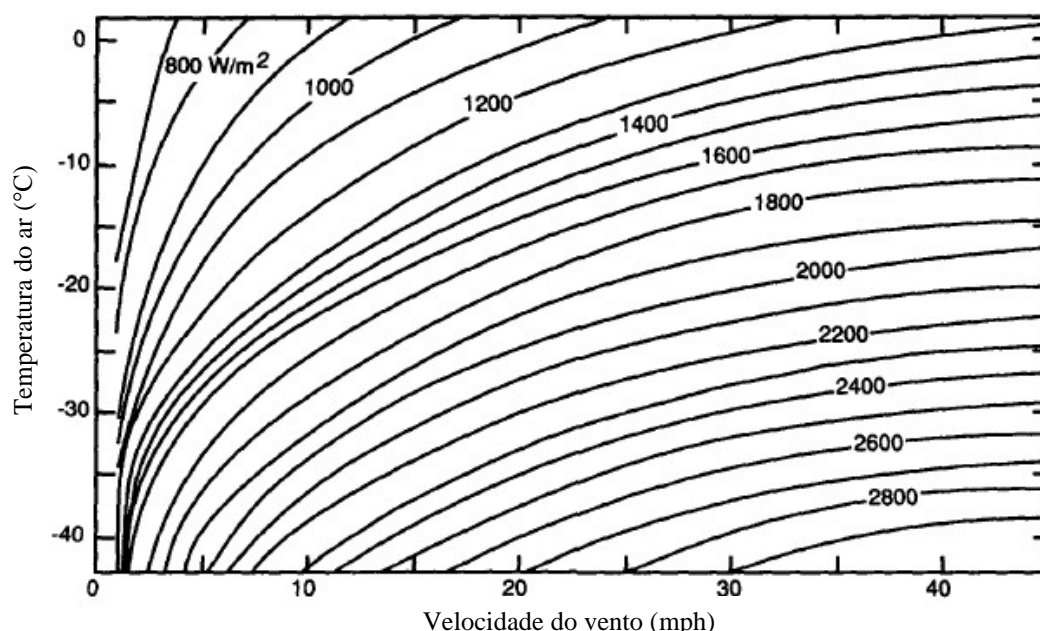


Figura 26 – Perda de calor sob várias temperaturas na presença de vento (Diemand, 1991b).

Se o veículo for estacionado em uma garagem coberta e aquecida, não serão necessários muitos esforços para colocá-lo em operação. Se estiver estacionado em uma garagem não aquecida, os aquecedores do bloco e do óleo lubrificante em conjunto com adequados lubrificantes para baixas temperaturas devem ser suficientes. Por fim, se o veículo estiver exposto a ventos e baixas temperaturas, o aquecimento deve ser considerado para o bloco, cârter, bateria, ar de admissão e outros componentes, dependendo do tipo de motor e se o compartimento do motor estiver bem isolado (Diemand, 1991b).

Para partir um motor Diesel em temperaturas abaixo de zero, além do apropriado combustível e óleo lubrificante, componentes auxiliares de partida podem ser usados. Em geral, os componentes auxiliares mais comuns podem ser divididos em duas categorias. Na primeira categoria estão os meios de, direta ou indiretamente, aumentar a temperatura do ar na câmara de combustão ao final da fase de compressão, deixando acima da temperatura de autoignição do combustível. Os métodos incluem o uso de aquecedores do óleo lubrificante e do líquido de arrefecimento, velas aquecedoras, e aquecedores do ar de admissão no coletor.

A segunda categoria inclui a adição de fluidos especiais de partida que têm menor temperatura de autoignição. Cada uma destas abordagens possui vantagens e desvantagens. Pode ser difícil adaptar uma vela aquecedora em um projeto de motor existente. Aquecedores do óleo e do líquido de arrefecimento geralmente demandam a alimentação elétrica que pode não estar disponível no campo. Aquecedores do ar de admissão drenam energia da bateria que necessita arrancar o motor. Fluidos de partida como o éter podem danificar o motor se usados imprópriamente (Sun *et al.*, 1994).

Para veículos que operam longos períodos de tempo sob condições árticas extremas, diferentes óleos lubrificantes, óleo Diesel e composições químicas de bateria são utilizados. Exemplos de práticas no norte do Alasca incluem o uso de um óleo lubrificante especial que tem muito menor viscosidade em baixas temperaturas que um óleo padrão 15W-40, o uso de combustível com menor ponto de fluidez e de névoa (DF-1) e Diesel ártico (DFA – *Diesel Fuel Arctic*) ao invés do Diesel tipo DF-2 e o uso de baterias com maior gravidade específica que diminui o ponto de congelamento do eletrólito.

Nas próximas seções, dispositivos que compõem alguns subsistemas do motor e/ou influenciam a operação a frio foram estudados para se conhecer os benefícios e desvantagens na aplicação de técnicas e componentes para auxiliar a partida a frio do motor Diesel.

## **4.2 Ar de admissão**

Aumentando a temperatura do ar admitido no motor a temperatura do ar comprimido também é aumentada. A aplicação de aquecedores do ar de admissão é, portanto um dos meios mais comumente aplicados para a obtenção de uma adequada partida a frio do motor. Isto pode ocorrer tanto no início da admissão do ar no motor, ou seja, na entrada do coletor de admissão de ar, como também na entrada do ar no cilindro do motor através da aplicação de velas aquecedoras na câmara de combustão.

Pode-se ver na Figura 27 que em temperaturas abaixo de -5 °C o componente auxiliar proporciona uma substancial melhora no tempo de partida, e estende a temperatura limite de partida.

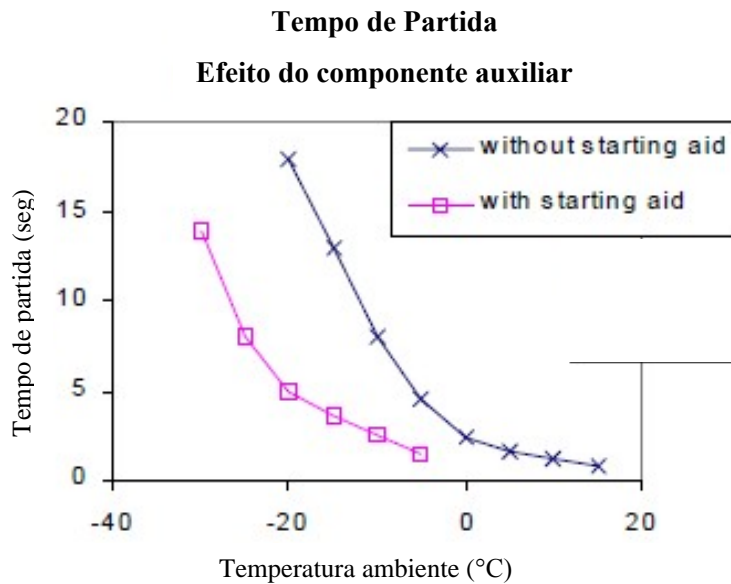


Figura 27 – Efeito de um componente auxiliar de partida a frio no tempo de partida (Mann *et al.*, 1999).

#### 4.2.1 Vela aquecedora

A vela aquecedora foi uma solução importada dos motores de injeção indireta de Diesel e é muito utilizada em motores de porte pequeno e médio. Os motores mais modernos com menores taxas de compressão utilizam velas aquecedoras cerâmicas ou metálicas de baixa tensão de alimentação – cuja superfície alcança temperaturas maiores do que as soluções anteriormente aplicadas. São montadas no cabeçote dos cilindros, projetando-se cerca de 3 a 4 mm dentro da câmara de combustão. Com o injetor localizado próximo à vela, a evaporação do combustível, a mistura com o ar e a ignição são promovidas por este elemento e a ignição é iniciada em um ambiente quente. Quando uma dada quantidade de combustível é injetada na câmara de combustão, parte deste combustível evapora rapidamente em torno da vela aquecedora criando uma região onde a ignição pode ocorrer (Payri *et al.*, 2006).

Velas aquecedoras metálicas têm formato de caneta, com um elemento aquecedor tubular. Este tipo de material sofre com altas taxas de corrosão, baixa vida útil, baixo tempo de resposta e baixas temperaturas de operação. Foram aplicadas em sua maioria até o ano 2000. Uma evolução apresentada foram as velas aquecedoras metal-cerâmica com alguma melhora no desempenho em

relação à vela metálica, porém apresentando problemas no elemento metálico em temperaturas mais elevadas e incompatibilidades na interface metal-cerâmica, além de baixa condutividade térmica permanente. A tecnologia mais empregada atualmente é a de elemento completamente cerâmico.

Uma vela aquecedora atua menos como uma fonte externa de calor para aumentar a temperatura do ar comprimido do que como um ponto incandescente que inflamará qualquer óleo combustível que estiver diante dele (Nunney, 2006). As velas aquecedoras idealmente são mais apropriadas para motores de pequenas cilindradas, alcançando partidas bem sucedidas a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  uma vez que a extremidade da vela aquecedora chega mais de  $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Há também um grande benefício em emissões na partida a frio e marcha lenta durante o período de aquecimento do motor. Para cilindradas acima de  $1.000\text{ cm}^3$  por cilindro, aquecedores do ar de admissão provêm uma solução mais confiável para o problema de partida a frio (Lindl e Schmitz, 1999).

A vela aquecedora possui uma construção básica similar a uma vela de ignição, mas difere por possuir um filamento resistivo no lugar do par de eletrodos. A vela aquecedora de cada cilindro recebe energia da bateria do veículo, através da chave de ignição. Durante o período de pré-aquecimento o filamento alcança temperaturas de  $900$  a  $1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mas, uma vez que o motor partiu e o pré-aquecimento não é mais requerido, o filamento é desligado e a sua temperatura se reduz à gerada pela combustão (Nunney, 2006).

Os requisitos dos sistemas modernos de velas aquecedoras são os seguintes (Kern *et al.*, 1999):

- Rápido tempo de aquecimento;
- Altas temperaturas de operação;
- Baixo consumo de corrente elétrica;
- Longa vida útil;
- Controle individual das velas e diagnóstico de falha na ativação;
- Redução de ruído e emissões por meio de pré-aquecimento (*pre-glow*), pós-aquecimento (*post-glow*) e funções de aquecimento intermediárias.

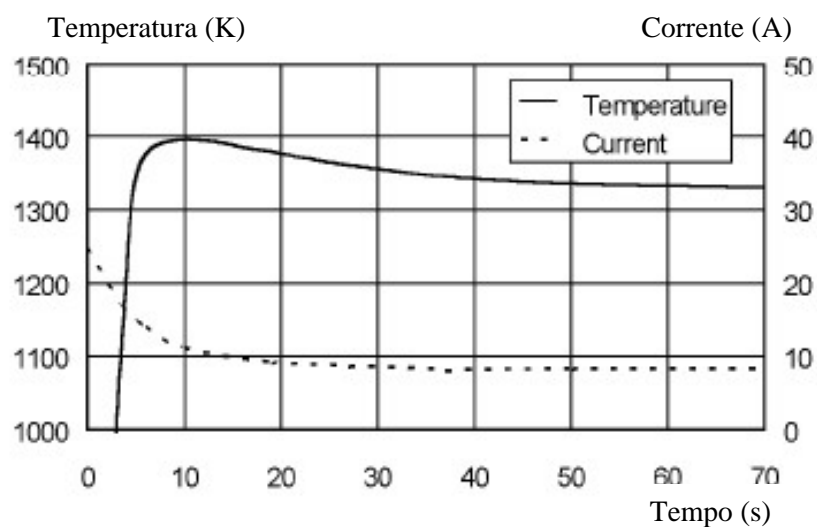


Figura 28 – Curvas típicas de temperatura e corrente em função do tempo, de velas aquecedoras auto ajustáveis, a uma tensão de alimentação de 11 V (Lindl e Schmitz, 1999).

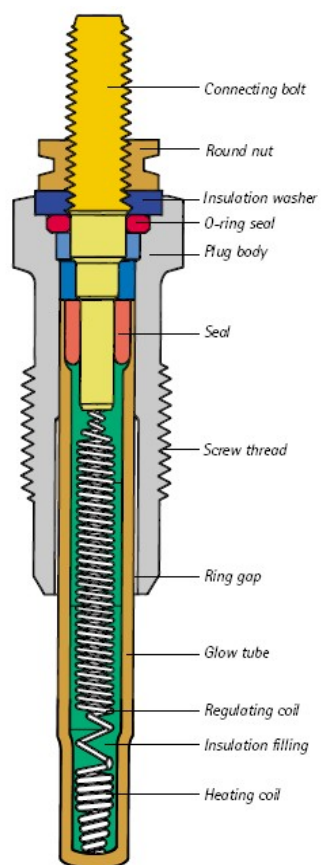


Figura 29 – Estrutura de uma vela aquecedora auto regulável de acionamento rápido (Beru).

Veículos antigos são geralmente equipados com velas aquecedoras que somente inflamam antes e durante a fase de partida. Veículos modernos utilizam velas aquecedoras que atuam em três fases. A Figura 30 apresenta um gráfico com as três fases.

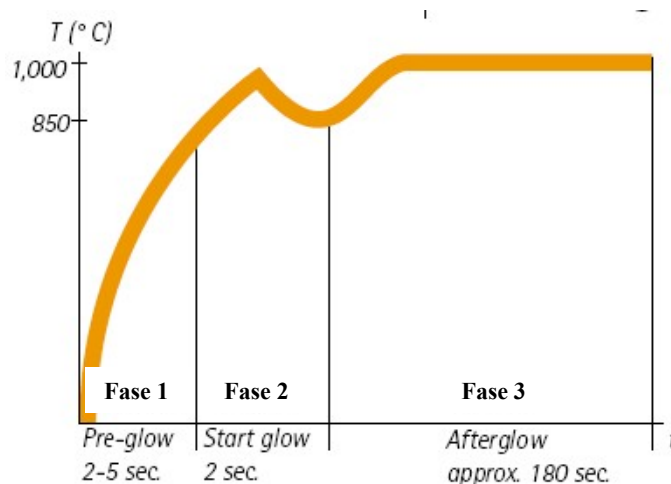


Figura 30 – As três fases de trabalho da vela aquecedora (Beru).

Velas aquecedoras com elemento cerâmico caracterizam-se por seu baixo consumo de corrente não obstante a sua alta velocidade de aquecimento e a alta temperatura em que deve operar. A corrente é 50% daquela que é consumida por uma vela aquecedora como elemento metálico (Figura 31).

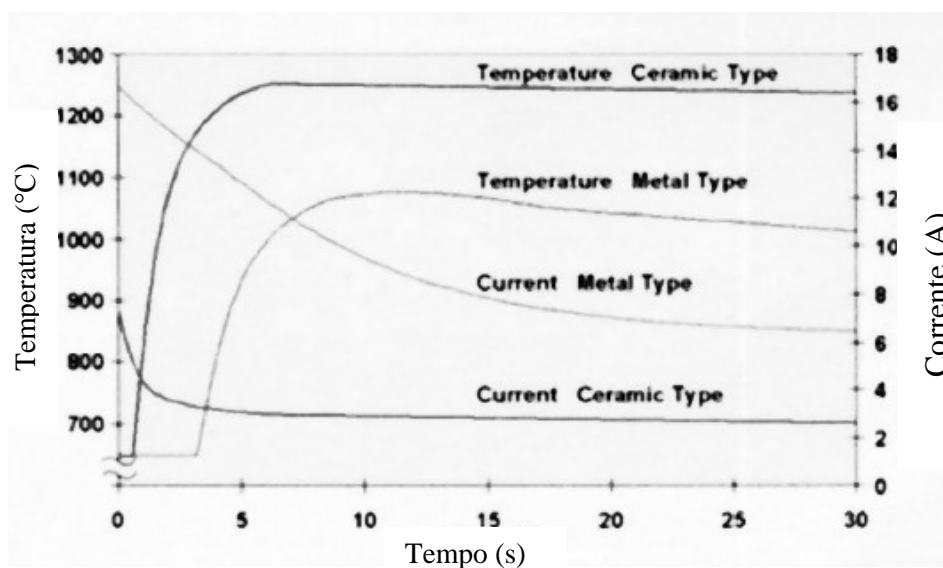


Figura 31 – Vela aquecedora de elemento cerâmico comparada com vela aquecedora de elemento metálico (Kern *et al.*, 1999).

Outro importante critério das velas aquecedoras é uma vida útil estendida. Kern *et al.* (1999) realizaram testes de durabilidade e constatou que a vida útil de velas com elemento cerâmico é o dobro das velas com elemento metálico.

Estes dispositivos, quase universalmente aplicados pelas montadoras de veículos, apresentam, no entanto alguns inconvenientes, sendo os principais: reduzida confiabilidade, montagem delicada, influência adversa no processo de combustão sob condições normais de operação do motor (elemento intruso), alta emissão de fumaça durante a partida e baixa estabilidade do motor após a partida. A solução alternativa para auxiliar a partida a frio é o uso do aquecedor de ar nos sistema de admissão no lugar da vela aquecedora no cabeçote de cilindros (Payri *et al.*, 2006).

#### **4.2.2 Aquecedor do ar de admissão**

Este dispositivo aquece o ar admitido e é montado no coletor de admissão do motor. Ele recebe energia da bateria do veículo (assim como a vela aquecedora). É usado frequentemente em motores Diesel médios e grandes, que em princípio teriam menor dificuldade de partida a frio do que os motores pequenos (são motores mais adiabáticos, não perdem tanto calor). Com a tecnologia de aquecimento do ar de admissão, não existe uma região mais quente e a ignição é favorecida pelo aumento global da temperatura do gás na câmara de combustão (Payri *et al.*, 2006).

O aquecedor é termicamente muito ineficiente porque uma grande proporção do aquecimento adicionado ao ar de combustão é perdida por radiação e convecção com as paredes do coletor de admissão e as partes frias das válvulas de admissão, pistões, câmara de combustão e paredes do cilindro. Mesmo assim, provendo a requerida quantidade de energia que pode ser disponibilizada, o aquecedor torna-se um elemento auxiliar de partida eficaz, que pode ser aplicado em motores de injeção indireta e direta.

Este aquecedor tem a vantagem de que não consome qualquer oxigênio contido no ar de combustão do motor, mas seu campo de aplicação é restrito pelo alto requisito de energia: da ordem de 400 W/l do volume do cilindro, e esta demanda concorre com a alta demanda do motor de partida. É essencial então que a bateria possua uma alta capacidade para garantir que a

velocidade de arranque do motor não seja prejudicada pela carga elétrica adicional. O efeito benéfico do aquecimento do ar de combustão compensa a redução na velocidade de arranque, que é um fator muito significativo na capacidade de partida a frio de um motor Diesel.

Pode-se ver na Figura 32 o rápido período de aquecimento de um aquecedor resultando no aquecimento do ar de admissão aplicado a um motor de 6 litros com 6 cilindros em marcha lenta.

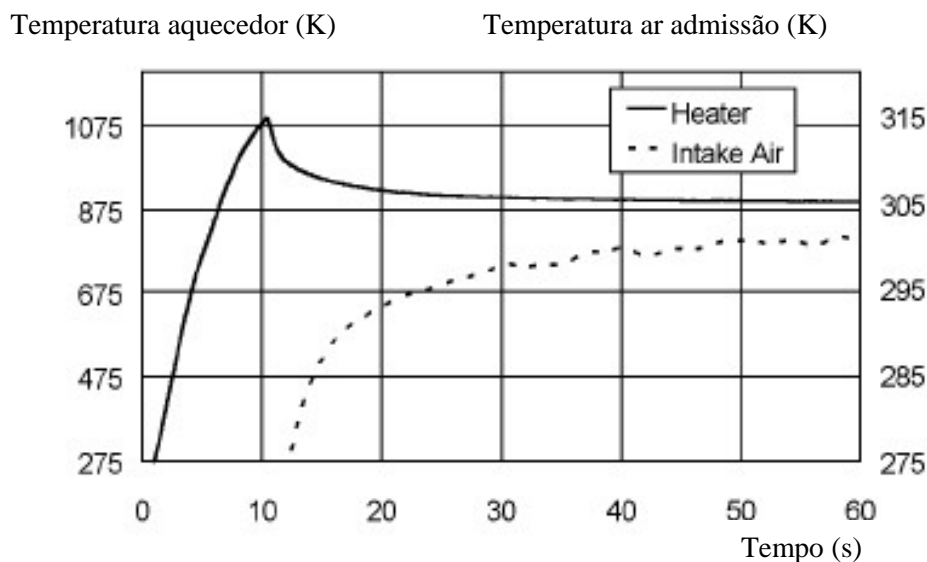


Figura 32 – Temperatura ao longo do tempo de um aquecedor e do ar de admissão de um aquecedor auto regulável em um motor de 6 litros (Lindl e Schmitz, 1999).

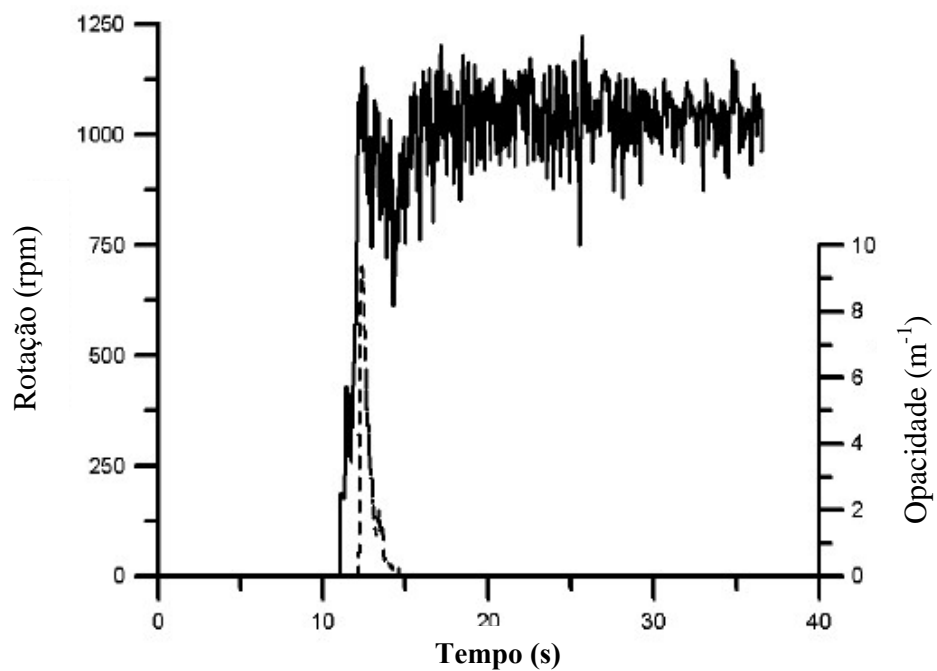
O fenômeno físico que leva à ignição em ambas as situações (vela aquecedora e aquecedor do ar de admissão) deve ser diferente e a importância dos fatores de controle do processo de partida a frio (temperatura do gás, estratégia de injeção e aderência das paredes do cilindro) deve ser analisada. As extremas dificuldades de partida a frio em baixas taxas de compressão em motores de pequeno porte motivaram alguns pesquisadores a considerar a tecnologia do aquecedor do ar de admissão como um sistema de auxílio complementar à vela aquecedora (Payri *et al.*, 2006).

### Avaliação do potencial do aquecedor do ar de admissão

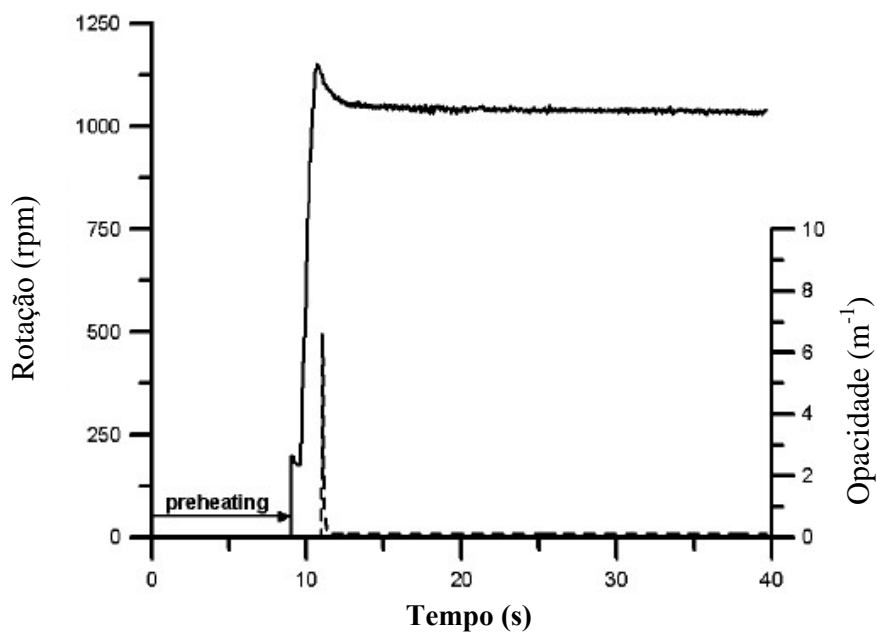
**Partida a frio** – A Figura 33 mostra os resultados do teste de partida a frio a  $-20^{\circ}\text{C}$  utilizando velas aquecedoras metálicas (a) e o aquecedor do ar de admissão (b). Na Tabela 10, os



parâmetros considerados nos testes.



(a)



(b)

Figura 33 – Resultados de partida a frio a -20 °C utilizando (a) velas aquecedoras, (b) aquecedor do ar de admissão: velocidade instantânea (linha sólida), opacidade (linha pontilhada) (Payri *et al.*, 2006).

Tabela 10 – Desempenho de partida do motor nos testes de partida a frio a -20 °C (Payri *et al.*, 2006).

	Vela aquecedora (a)	Aquecedor do ar de admissão(b)
<b>Tempo de pré-aquecimento (s)</b>	11,0	9,0
<b>Tempo de partida (s)</b>	1,14	1,4
<b>Velocidade estabilizada após a partida (rpm)</b>	± 70	± 6
<b>Velocidade limite do motor (rpm)</b>	1.150	1.150
<b>Pico de fumaça (m<sup>-1</sup>)</b>	9,0	6,5

Os resultados confirmam o potencial do aquecedor do ar de admissão para a partida a frio do motor. Em comparação com os dados da vela aquecedora, o tempo de partida é ligeiramente maior porem com melhor dirigibilidade (melhor estabilização da velocidade após a partida).

#### 4.3 Combustível

Problemas com combustíveis a temperaturas muito baixas acontecem predominantemente devido ao aumento da viscosidade e diminuição da volatilidade do combustível, à formação de cera e à contaminação por água. Isto é especialmente verdade para o óleo Diesel (Diemand, 1991a). Os combustíveis mais pesados são raramente usados em regiões frias porque eles tendem a se solidificar em temperaturas relativamente altas. Todavia, mesmo combustíveis mais leves terão grande dificuldade com a ignição em função da queda de temperatura, e o aquecimento do tanque de combustível (ou pelo menos as linhas de circulação de combustível) deve ser considerado (Diemand e Lever, 2004).

Um problema comum em ambientes frios é a formação de cera no sistema de combustível, particularmente no filtro de combustível, que pode resultar no entupimento do sistema de combustível, com o bloqueio na injeção de combustível e o motor não funciona. Três abordagens são usualmente aplicadas para prevenir este bloqueio, além do cuidado em se utilizar o

combustível correto para a faixa de temperatura em que o motor deverá partir (Stouffer *et al.*, 2000):

- desenvolver um sistema que sempre mantém o combustível aquecido, mesmo quando o motor não está em funcionamento (em ambientes extremamente frios os aquecedores elétricos devem ser usados para aquecer o combustível que entra no filtro de combustível) e/ou aquecer o combustível que retorna da bomba de combustível para o tanque;
- misturar aditivos ao combustível para diminuir o ponto de fluidez (modificar os cristais de cera para garantir que o motor continue rodando e dissolva os cristais rapidamente uma vez que o motor atinge a temperatura de operação) ou diluir o combustível com Diesel DF-1 em quantidade suficiente para evitar a formação de cera;
- deixar o motor ligado o tempo todo.

A taxa da mistura ar-combustível para motores Diesel é aproximadamente 15:1. Considerando as diferenças entre o calor específico do ar e do óleo Diesel, a quantidade de energia transferida para o cilindro do motor para aumentar a temperatura do combustível é somente um décimo do aumento da temperatura do ar. Então, o aumento da temperatura do combustível tem pequeno impacto sobre a temperatura no cilindro próximo ao final do tempo de compressão (Stouffer *et al.*, 2000).

O número de cetano é o parâmetro do combustível mais dominante e que tem a maior efetividade em motores frios, como pode ser visto na Figura 34, sendo que a alteração de outros parâmetros sequer apresentam algum efeito, ou são relativamente pequenos e complexos (Stouffer *et al.*, 2000). Um aumento de cerca de 10 no número de cetano reduzirá pela metade o tempo de partida e diminuirá a temperatura em que o motor pode partir. Este aumento do número de cetano tem um pequeno efeito no desempenho na operação do motor. O número de cetano de um combustível pode ser aumentado misturando-o com outro combustível com maior número de cetano ou pelo uso de um aditivo com o mesmo fim (Diemand, 1991a).

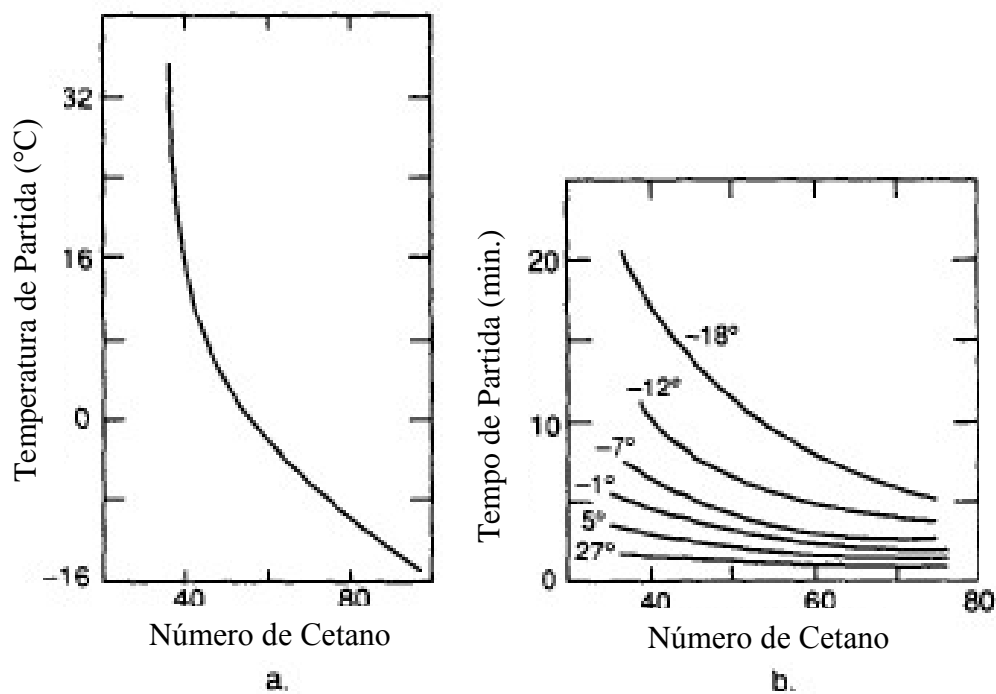


Figura 34 – Efeito do número de cetano na partida do motor: a) efeito na temperatura em que o motor partirá facilmente; b) efeito no tempo de partida em temperaturas entre -18 °C e 27 °C (Diemand, 1991a).

Por fim, mudanças na localização do filtro de combustível e sua porosidade também impactam na operação em baixas temperaturas de veículos pesados (Chandler e Zechman, 2000).

#### 4.3.1 Aquecedor do combustível

Existem dois tipos de aquecedores elétricos de combustível: com PTC e resistência. Devido a limitações de potência do veículo, o aquecedor poderá não ter suficiente capacidade para aquecer altos fluxos de combustível. Porém, se o início do congelamento do combustível começar a bloquear o filtro, o fluxo pelo filtro será menor até um valor em que o aquecedor seja efetivo e o filtro possa ainda circular combustível suficiente para permitir o motor rodar e aquecer. O fluxo pode não ser suficiente para rodar o motor em condição de carga.

O aquecedor de resistência produz um aquecimento constante independente do combustível estar em movimento ou não e é energizado quando o veículo está estacionado. Opera com 110 ou

220 VAC e permite uma partida fácil em ambientes frios atuando em conjunto com aquecedores do bloco/líquido de arrefecimento e do lubrificante.

O aquecedor com PTC utiliza um disco de aquecimento que transfere o calor gerado ao fluxo de combustível. É mais efetivo quando o combustível está em constante movimento e quando o fluxo é interrompido ou a temperatura aumenta, ele se auto-regula para uma menor corrente.

Aquecedores de combustível devem ser usados em condições extremas (polares) para aquecer o combustível antes da partida. São instalados geralmente na linha de combustível que vem do tanque ou diretamente no filtro de combustível. Podem ser controlados com um termostato quando atingir uma temperatura desejada ou pelo módulo de controle do motor, ajustando o tempo em que o aquecedor deve ficar ligado antes da tentativa de partida.

A incorporação de um aquecedor de combustível provê maior fonte de calor para minimizar os problemas de formação de cera, melhora o desempenho em baixas temperaturas e previne a entupimentos no filtro de combustível.

#### **4.3.2 BioDiesel**

Para partidas a frio o sistema de velas aquecedoras e de injeção deve ser calibrado com tempos e potências maiores dependendo da relação de mistura combustível. O BioDiesel apresenta maior viscosidade em baixas temperaturas, implicando em quantidades menores para injeções controladas por tempo, ocasionando demora e aspereza nas partidas a frio. O aumento do tempo de injeção e/ou utilização de aquecedores de combustível são aconselháveis para uso em regiões frias (Hill, 2005).

Apesar das inúmeras vantagens que o BioDiesel apresenta, o desempenho a baixas temperaturas pode afetar sua viabilidade comercial ao longo de todo o ano, particularmente em regiões climáticas de temperaturas moderadas. Testes de desempenho de BioDiesel em climas frios evidenciam que, quando a temperatura ambiente se aproxima de -2 °C, aumenta a ocorrência de problemas de desempenho dos motores (Chiu *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 1995; 1996). Quedas bruscas na temperatura ambiente promovem o aumento da viscosidade e a cristalização de ésteres graxos saturados que podem causar o entupimento de filtros de óleo e sistemas de injeção.

Obviamente, este problema não é exclusivo do BioDiesel, pois o Diesel contém parafinas que apresentam o mesmo comportamento.

Atualmente, diversos aditivos comerciais são utilizados para melhorar as propriedades de fluxo do óleo Diesel e permitir sua comercialização em condições de temperatura mais baixa. Porém um aditivo eficiente para a redução do ponto de fluidez (PP) geralmente não apresenta bons resultados sobre o ponto de névoa (CP), devido aos mecanismos de ação diferenciados. Sabe-se ainda que alguns compostos poliméricos apresentam resultados bastante satisfatórios quando utilizados individualmente ou em conjunto. Sua utilização é frequentemente mencionada na literatura como a solução mais eficaz e econômica para o controle da maioria dos problemas de fluxo de óleo cru e de derivados de petróleo. O papel destes aditivos é o de retardar ou modificar a cristalização dos constituintes parafínicos do óleo, melhorando as suas propriedades de fluxo (El-Gamal *et al.*, 1998; Fremel, 1993; Silva *et al.*, 2004). Apesar de bem menos complexo que o óleo Diesel, o BioDiesel também apresenta uma grande variação de composição, que depende da natureza do óleo vegetal ou gordura animal que lhe deu origem.

Randazzo (2009) realizou testes de partida a frio em câmara climática com tempo de condicionamento do veículo por 12 horas na temperatura ambiente de -5 °C. O condicionamento tem por finalidade possibilitar que todos os sistemas do veículo estejam em regime permanente no momento da partida. Tal procedimento é prática comum na indústria automotiva e entre os fabricantes de componentes do sistema de partida do motor.

A câmara não possuía sistema de pressurização, tendo sido os testes realizados sob a pressão atmosférica local (900 mbar) e umidade relativa de 0%.

O ponto de entupimento de filtro a frio determinado pelos testes com as misturas de óleo Diesel-BioDiesel apresenta valores inferiores ao valor máximo de 0 °C (Figura 35), estabelecido pela legislação brasileira. Destaca-se o baixo valor de CFPP do óleo Diesel S10, igual a -26°C. O óleo Diesel S10 tem o CFPP especificado na faixa de +5 a -44°C para países árticos e de inverno severo, conforme a norma EN590 (ECS, 2009). É observada uma diferença significativa somente entre o CFPP do combustível S10 e as demais misturas de BioDiesel com óleo Diesel S500. Ressalta-se que a adição de etanol ao B20 nas concentrações de 2 e 5% não alterou seu CFPP, igual a -7 °C. Tal característica tem influência no desempenho da partida a frio do motor em condição sub-zero. O ponto de entupimento representa a temperatura ambiente na qual o óleo

Diesel começa a causar entupimento de filtros, dificuldade de bombeamento e de atomização da mistura ar-combustível para queima na câmara de combustão.

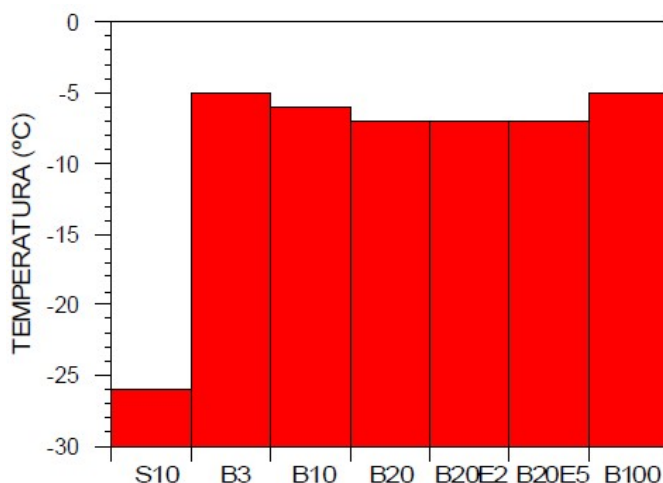


Figura 35 – CFPP para as diferentes misturas de BioDiesel (Randazzo, 2009).

As misturas B20, B20E2 e B20E5 possuem elevada volatilidade sob temperaturas de destilação abaixo de T30, o que indica uma maior facilidade do combustível em volatilizar, auxiliando o início da queima da mistura e, conseqüentemente, o início de funcionamento do motor em condições ambientais de temperaturas abaixo de 0 °C. Neste trabalho foi realizado o teste de partida a frio na temperatura ambiente de -5 °C, que representa a menor temperatura média invernal do Brasil.

A Figura 36 mostra que a partida do motor não foi dificultosa, apresentando um tempo curto para todas as misturas (o tempo de partida a frio é considerado aceitável até 3 s). Este resultado está de acordo com o estudo realizado por Lapuerta *et al.* (2007), que afirmam que misturas de óleo Diesel com até 10% v/v de etanol podem ser utilizadas em motores Diesel em países nos quais as temperaturas no inverno não atingem valores abaixo de -5 °C.

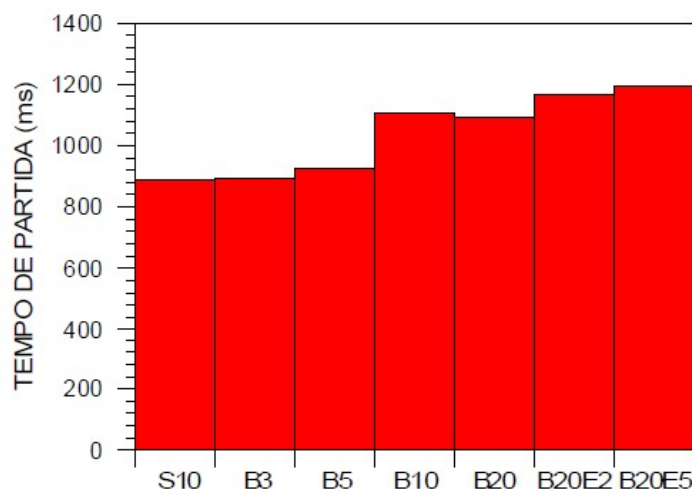


Figura 36 – Tempos de partida a frio para as diferentes misturas de BioDiesel (Randazzo, 2009).

Não ocorreu dificuldade na partida do motor sob a temperatura ambiente de -5 °C operando com as misturas de óleo Diesel e BioDiesel, nem mesmo com a mistura contendo 20% de BioDiesel e 5% de etanol (B20E5). Todavia, foram constatados inconvenientes transitórios durante a fase de aquecimento do motor, tais como oscilação da velocidade angular do motor e elevação do ruído gerado pela queima das misturas contendo BioDiesel. Quanto à dirigibilidade durante o período de aquecimento do veículo, constatou-se maior disponibilidade de potência nas acelerações e nas retomadas com o uso das misturas contendo etanol.

#### 4.4 Líquido de arrefecimento e Bloco do motor

Com uma mistura apropriada de solução anticongelante e água, o líquido de arrefecimento do motor não congelará acima de -40 °C. Na verdade, mesmo abaixo deste valor não ocorrerá dano ao motor desde que o congelamento ocorra de maneira a não causar uma expansão danosa como ocorreria com água pura. Todavia, se o motor é forçado a partir quando o líquido de arrefecimento não está completamente líquido, este não circulará apropriadamente e o dano ao motor poderia resultar de um superaquecimento local ou dano na bomba de circulação (Diemand e Lever, 2004).

O aumento da temperatura do bloco causará perda menor da transferência de calor para as paredes do cilindro e menor atrito durante o arranque. Evidências sobre a eficácia de se manter o



bloco do motor a temperaturas elevadas são apresentadas através do uso de aquecedores do bloco do motor. Sozinha, a temperatura do líquido de arrefecimento do motor tem pouca contribuição para melhorar a partida, mas o aquecimento do bloco do motor pelo líquido de arrefecimento aquecido é eficaz para melhorar a partida (Stouffer *et al.*, 2000).

#### **4.4.1 Aquecedor do líquido de arrefecimento e bloco do motor**

Aquecedores do líquido de arrefecimento empregam uma troca de calor média do líquido. Quando o líquido aquecido circula por convecção natural, o calor pode concentrar-se em uma pequena área e levar a um superaquecimento local. A condição ideal é que o líquido aquecido forneça calor para os cilindros, aquecendo a câmara de combustão e o combustível em torno das paredes do cilindro, mas também pode ser usado para aquecer outros componentes, como as linhas de combustível, o tanque de combustível, bateria, etc., utilizando trocadores de calor.

Este dispositivo aquece o líquido de arrefecimento no bloco do motor através do aumento da temperatura do bloco do motor. Isto aumenta a quantidade de combustível vaporizado durante a partida e os primeiros minutos de operação do motor, permitindo uma mistura mais pobre do que seria necessário em baixas temperaturas e garantindo uma partida mais rápida e fácil.

Métodos de redução de emissões de carbono e hidrocarbonetos em condições ambientais de baixas temperaturas incluem o uso de aquecedores do bloco que são considerados para reduzir o gasto de energia causado pela condensação do combustível dentro da câmara de combustão (Bielaczyc e Merkisz, 1998).

O uso do aquecedor do bloco pode proporcionar um benefício adicional na redução do consumo de combustível durante a parcela de partida a frio do motor. O aquecedor do líquido de arrefecimento pode ser ativado tão logo o motor seja desligado, para prevenir um rápido resfriamento do motor.

Na Figura 37 observam-se as potências de aquecimento para trazer motores de diversos tamanhos até -1,1 °C da temperatura inicial indicada. As curvas são baseadas em um tempo de aquecimento de 12 horas com a elevação de 80% da temperatura ocorrendo nas primeiras 5 horas. Estas curvas não levam em conta o efeito do vento ou da isolamento, mas podem ser usadas como uma referência para os requisitos de aquecimento (Diemand, 1991b).

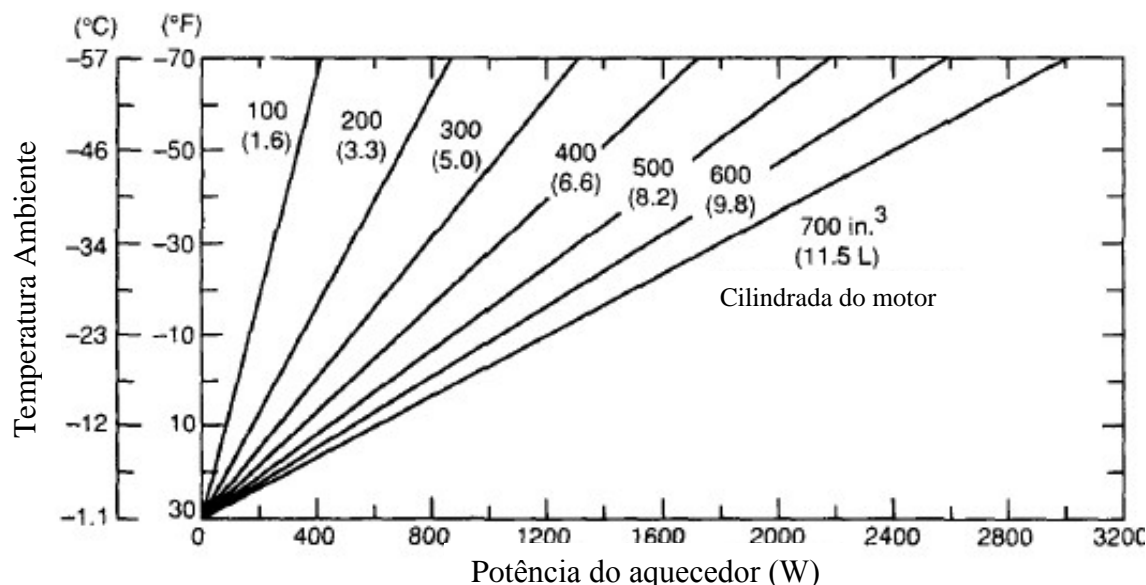


Figura 37 – Potência de aquecimento requerida para elevar a temperatura do líquido de arrefecimento no bloco para -1,1 °C em motores com os cilindros em linha (Diemand, 1991b).

Existem aquecedores cuja função é manter o motor em um estado possível de partida e não seria normalmente utilizado sozinho para pré-aquecer um motor frio. Portanto, as 12 horas de aquecimento devem ser consideradas para representar o nível de temperatura que o motor ficará quando o aquecedor for ativado logo após o motor ser desligado (Diemand, 1991b).

#### 4.5 Óleo Lubrificante

O lubrificante representa um dos problemas mais críticos encontrados por veículos em regiões frias (Diemand, 1990). Óleos lubrificantes de motores devem trabalhar efetivamente sob temperaturas ambiente extremamente baixas e altas temperaturas durante a plena carga.

Problemas de partida a frio e lubrificação pobre acontecem se o óleo do motor está muito viscoso a baixas temperaturas. Prolongados período em condição de marcha lenta a baixas temperaturas também podem causar a formação excessiva de borras dos produtos do *blowby*, incluindo água, gases, e combustível não queimado.

O óleo lubrificante também tem uma grande importância na facilidade de partida a frio do motor, pois afeta a velocidade de arranque obtida na temperatura de operação. Além disso, o óleo

do motor deve atuar adequadamente uma vez que a partida já ocorreu, provendo boas condições de bombeabilidade para permitir a circulação do óleo do cárter por todas as partes móveis.

A Tabela 11 apresenta os índices de viscosidade do óleo lubrificante. O índice de viscosidade do óleo apropriado é determinado pela mínima temperatura ambiente durante a partida do motor frio, e a máxima temperatura ambiente durante a operação do motor. Em geral usa-se a maior viscosidade do óleo possível para atingir o requisito para a temperatura de partida.

Tabela 11 – Viscosidade de óleo lubrificante em temperaturas ambiente (adaptado de SAE).

Temperatura Ambiente		
Viscosidade	Mínima	Máxima
SAE 0W-20	-40 °C	10 °C
SAE 0W-30	-40 °C	30 °C
SAE 0W-40	-40 °C	40 °C
SAE 5W-30	-30 °C	30 °C
SAE 5W-40	-30 °C	50 °C
SAE 10W-30	-18 °C	40 °C
SAE 10W-40	-18 °C	50 °C
SAE 15W-40	-9,5 °C	50 °C

Nota: Aquecimento adicional é recomendado abaixo da mínima temperatura ambiente especificada.

O desempenho do óleo deve ser caracterizado por diversas medidas, incluído a viscosidade a temperaturas extremas (por exemplo, -30 °C e 100 °C), índice de viscosidade (um valor alto indica que o óleo é insensível a variações de temperatura), e a temperatura limite da capacidade de bombeamento (uma medida da habilidade do óleo circular a baixas temperaturas) (Diemand e Lever, 2004).

A Figura 38 ilustra o efeito da temperatura na viscosidade do óleo. Óleos multi-grau são particularmente importantes em regiões frias, onde baixos pontos de fluidez e baixas viscosidades são necessárias para garantir o mínimo desgaste na partida e satisfatória lubrificação em temperaturas normais de operação.

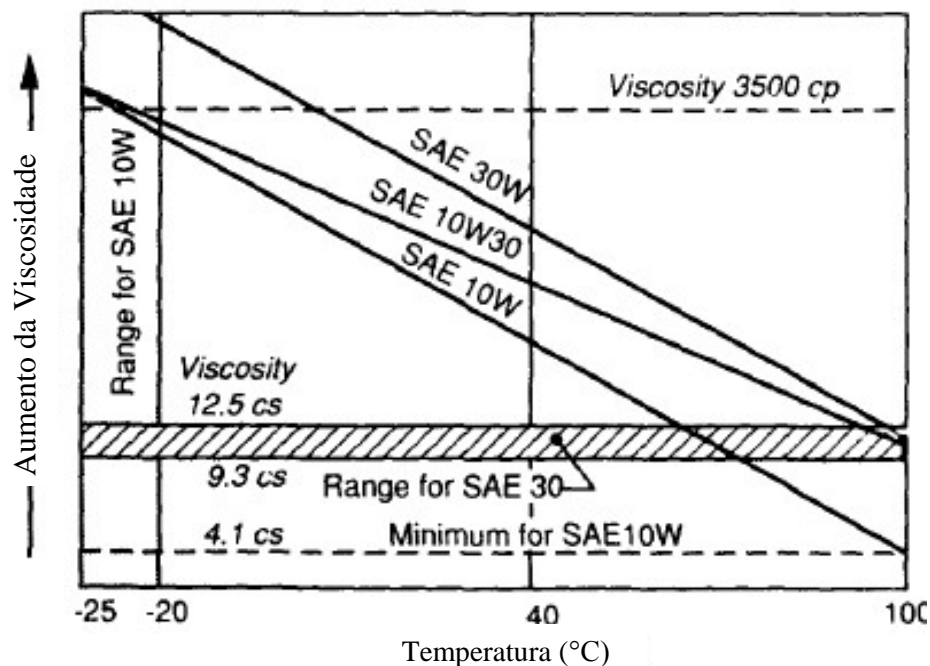


Figura 38 – Efeito da temperatura na viscosidade de óleos mono-grau e multi-grau (Diemand, 1990).

Diversos óleos de boa qualidade, que obedecem aos requisitos estão disponíveis no mercado, incluindo o tipo OEA (*Oil, Engine, Arctic*) que é um lubrificante sintético utilizado em temperaturas ambiente de -50 °C a 40 °C. Todos os motores em ambientes frios são equipados com aquecedores e tanto aquecedores de óleo do cárter quanto do bloco são altamente recomendados para minimizar os problemas decorrentes da partida a frio (Diemand, 1990).

#### 4.5.1 Aquecedor do óleo lubrificante

O óleo aquecido tem menor viscosidade, assim o motor consegue maior velocidade de arranque. Aquecedores elétricos de óleo são aplicados sob condições árticas de temperatura. Sob outras condições, deve-se tomar o cuidado de utilizar o óleo lubrificante especificado para as condições de temperatura de partida e de trabalho do motor (Stouffer *et al.*, 2000).

O aquecedor do óleo auxilia a partida a frio e alivia problemas de atrasos de ignição que podem ocorrer em temperaturas baixas. O aquecedor do óleo no cárter melhora seu fluxo e

garante um fornecimento ininterrupto de óleo para lubrificar os componentes do motor. Os motores preparados para operação em ambientes frios são projetados para facilitar a instalação do aquecedor do óleo lubrificante.

A Figura 39 mostra a potência recomendada do aquecedor de óleo para diferentes tamanhos de cárter a baixas temperaturas. Em motores maiores é comum o uso de dois cárteres, neste caso a potência observada no gráfico deve ser dividida pela metade e deve-se instalar um aquecedor em cada cárter com esta potência dividida (Diemand, 1991b).

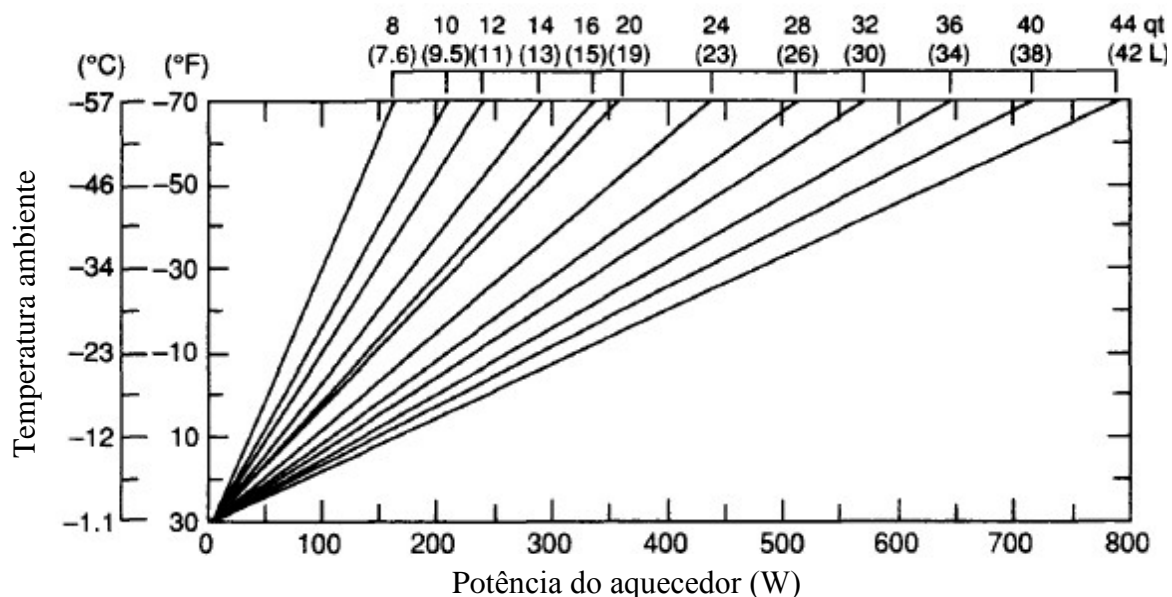


Figura 39 – Potência requerida de um aquecedor para elevar o óleo no cárter a -1,1 °C (Diemand, 1991b).

Com o aumento da eficiência dos motores Diesel de injeção direta de combustível, a potência de aquecimento requerida é menor durante o período de aquecimento do motor. Estudos anteriores mostraram que a baixa temperatura de óleo explica a maior parte do consumo e poluição. Então uma redução do período de aquecimento, através do pré-aquecimento do óleo, confere um decréscimo das emissões de poluentes e consumo, acrescentando conforto aos ocupantes do veículo e melhor desempenho ambiental (Champoussin *et al.*, 2000).

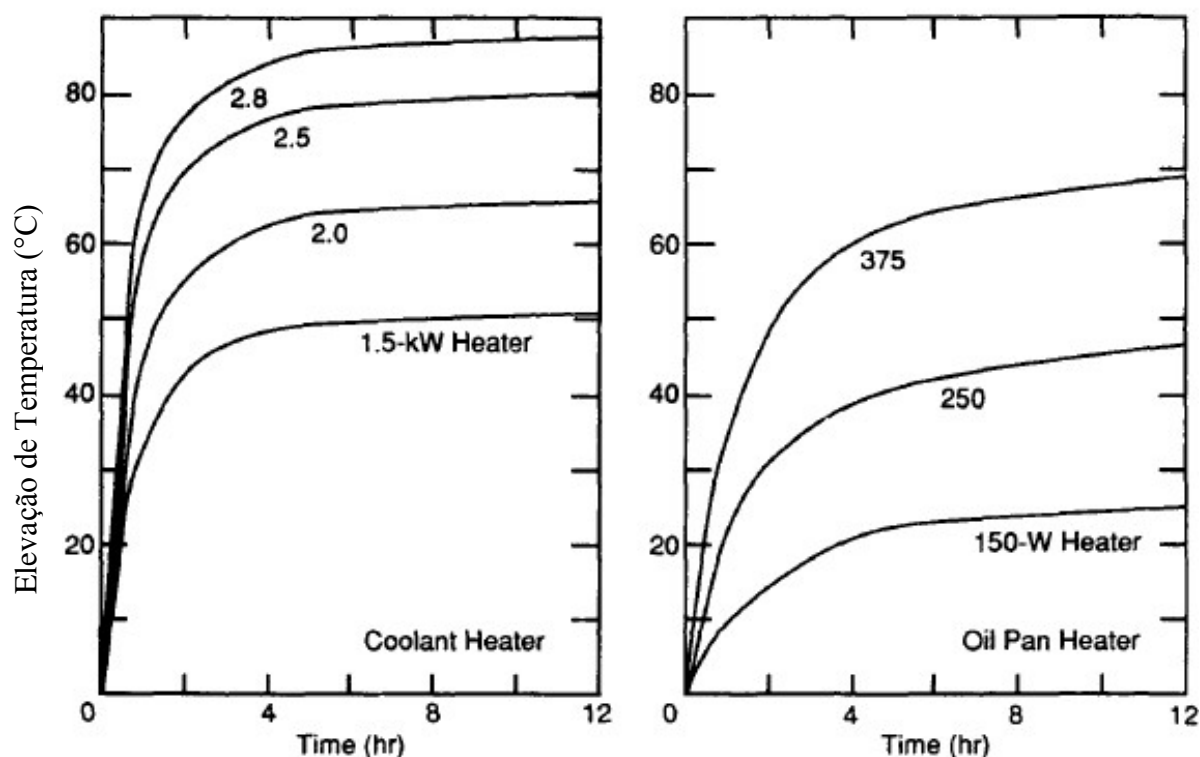


Figura 40 – Curvas de aquecimento para diferentes tamanhos de aquecedores do líquido de arrefecimento e do óleo do cârter testados em motor isolado resfriado.

Nota: as curvas representam essencialmente a elevação da temperatura até que a temperatura final seja obtida e que depois de cerca de 5 horas a maior temperatura possa ser mantida pelo aquecedor. Estas curvas serão diferentes para outros motores, graus de isolamento e condições do vento, mas em geral o formato será bem similar (Diemand, 1991b).

#### 4.6 Bateria

Uma bateria aquecida significa mais potência para o motor de partida e desta forma maior velocidade de arranque, o que será traduzido em maior temperatura de carga no cilindro e melhor capacidade de partida a frio (Stouffer *et al.*, 2000). Schatz (1992) afirma que o aquecimento da bateria em condições de temperatura abaixo de 0 °C melhora o desempenho do motor em termos de capacidade de partida a frio, fase de aquecimento do motor, redução de emissões de hidrocarbonetos e de ruído do motor.

Se a temperatura da bateria cai a valores abaixo de -18 °C a resistência da bateria aumenta substancialmente. Se a temperatura é aumentada para 0 °C, a corrente disponível aumenta em

cerca de 25%. Se a temperatura da bateria aumenta para cerca de 27 °C a corrente disponível aumenta para 40% acima do CCA especificado (*cold cranking amps* - corrente de arranque a frio). Acima desta temperatura não existe vantagem associada ao desempenho da bateria. Alguns testes determinaram que as baterias não se auto-aquecem suficientemente durante a descarga e a recarga para elevar a sua temperatura significativamente. Assim, as baterias precisam de um aquecedor para sua utilização a baixas temperaturas (Stouffer *et al.*, 2000). O maior problema da bateria em regiões frias é o congelamento, que pode quebrar o invólucro e danificar as células.

A Figura 41 mostra uma família de curvas representando a leitura em hidrômetro de uma bateria cuja gravidade específica, completamente carregada a 27°C é 1300. Nota-se a mudança na densidade do eletrólito em diferentes temperaturas e estados de carga. A curva do ponto de congelamento indica que uma bateria descarregada congelará em torno de -17 °C.

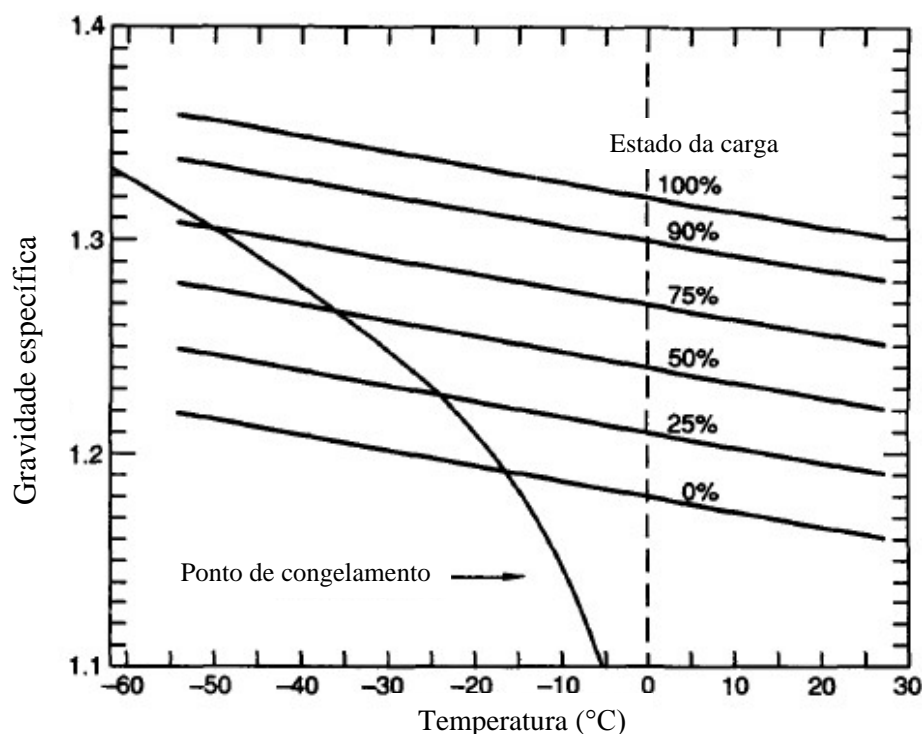


Figura 41 – Efeito da temperatura e estado de carga na gravidade específica do eletrólito da bateria e seu ponto de congelamento (Diemand, 1991c).

Outro problema comum em baixas temperaturas é que a carga se torna mais difícil, devido ao grande aumento da resistência interna da bateria. Com a queda de temperatura, o eletrólito se torna mais viscoso, e os processos químicos são afetados. Isto resulta em uma menor taxa de

carga e descarga. A Figura 42 mostra a redução de potência aparente de uma bateria completamente carregada em baixas temperaturas.

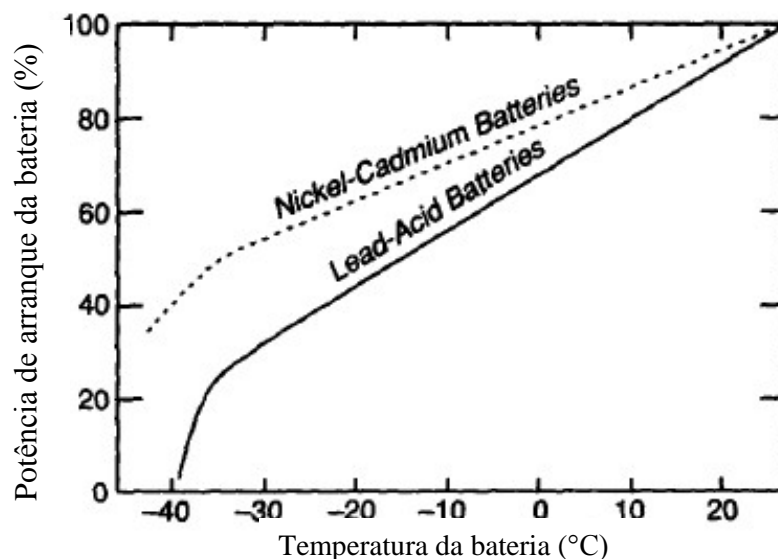


Figura 42 – Redução aparente de potência em uma bateria completamente carregada em baixas temperaturas (Diemand, 1991c).

O efeito da baixa temperatura no desempenho de uma bateria de chumbo-ácido é apresentado no gráfico da Figura 43. Este é o desempenho de uma bateria completamente carregada quando descarregada com uma corrente de 340 A em diferentes temperaturas. Em um ambiente de baixa temperatura aumenta o risco do eletrólito congelar e da bateria descarregar.

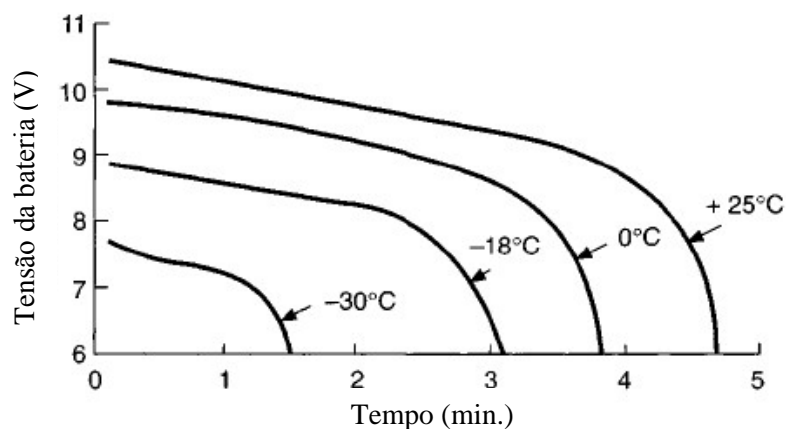


Figura 43 – Desempenho de uma bateria de chumbo-ácido em várias temperaturas (Challen e Baranescu, 1999).



Baterias de chumbo-ácido se tornam vulneráveis ao congelamento quando descarregadas, não carregam bem no frio, e perdem potência em baixas temperaturas. Uma boa prática é aquecer as baterias antes da partida a frio do motor ou de carregar as baterias (Diemand e Lever, 2004).

Baterias alcalinas de níquel-cádmio (NiCd) também são utilizadas para partir o motor, mas são significativamente maiores e mais caras que uma equivalente em chumbo-ácido; assim seu uso é geralmente restrito a aplicações especiais. Suas vantagens são a vida útil prolongada, baixa taxa de auto-descarga, construção robusta e a habilidade de permanecer por longos períodos com qualquer estágio de carga sem deterioração. As baterias alcalinas de níquel-cádmio têm a vantagem que a densidade do eletrólito não varia com o estado da carga. Para aplicações em temperaturas extremamente baixas um eletrólito especial pode ser usado, com ponto de congelamento em cerca de  $-42^{\circ}\text{C}$ .

Um dos métodos para aumentar a potência da bateria é o uso de baterias adicionais. Veículos leves deveriam ser equipados com duas baterias ou com uma bateria de maior capacidade. Em veículos pesados a recomendação é que se utilize uma bateria extra em climas frios.

#### **4.6.1 Aquecedor da bateria**

Se o motor necessita operar em temperaturas extremamente baixas existe uma boa justificativa para se isolar termicamente a bateria e promover alguma forma de aquecê-la, como por exemplo, utilizando uma manta térmica. Se a combustão for ineficiente durante a fase de aquecimento, picos de emissões e consumo elevado de combustível irão ocorrer bem como alto ruído do motor. Um meio de superar estes problemas é pré-aquecendo o motor e a bateria.

#### **4.6.2 Uso de supercapacitores**

Supercapacitores podem fornecer a potência transiente que o arranque do motor necessita em baixa temperatura, auxiliando a reduzir o volume da bateria de chumbo-ácido. Este sistema é denominado sistema híbrido para a partida a frio de motores Diesel. Resultados de laboratório mostraram que a resistência interna do supercapacitor é o fator chave para aumentar a capacidade

de arranque a frio (Liu *et al.*, 2008). Este tipo de tecnologia tem atraído a atenção de pesquisadores nos últimos anos.

Quando a carga da bateria e/ou a temperatura estão baixas, a bateria não consegue partir o motor. A Figura 44 mostra um teste com uma bateria usada de 180 Ah com estado de carga abaixo de 10% e temperatura de  $-28^{\circ}\text{C}$ . O motor não parte devido à baixa velocidade de arranque. Porém, na Figura 45 a partida é bem sucedida com a assistência de um supercapacitor de 28 F.

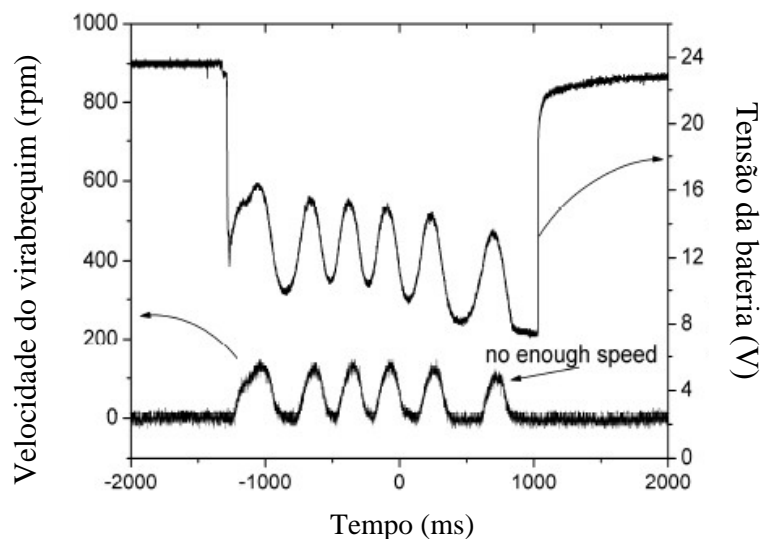


Figura 44 – Falha de partida com uso da bateria (Liu *et al.*, 2008).

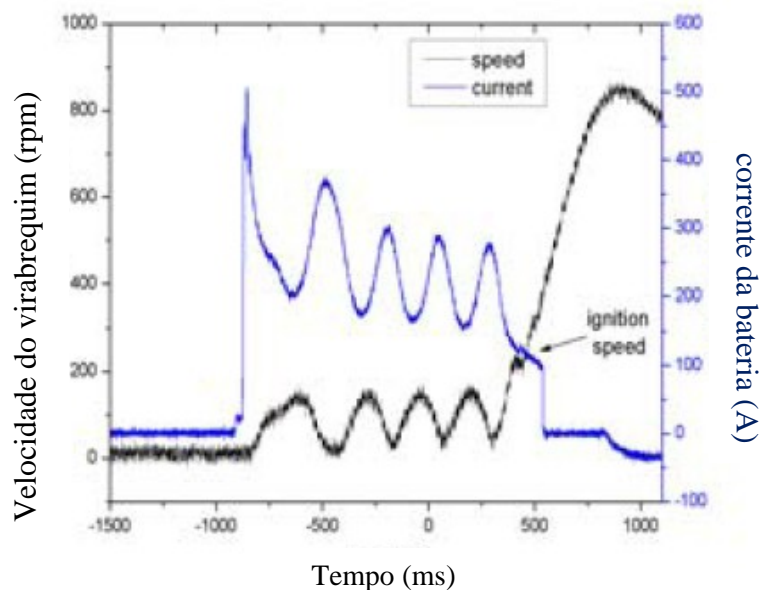


Figura 45 – Partida bem sucedida através do um do sistema híbrido (Liu *et al.*, 2008).

O custo do sistema híbrido é limitado pelo alto preço do supercapacitor e a pequena economia com a redução de volume da bateria, porém vem se mostrando cada vez mais factível e uma adequada combinação de um sistema híbrido pode chegar a ser mais barato do que uma bateria convencional, principalmente em climas muito frios. A Tabela 12 mostra uma comparação dos testes realizados em campo utilizando uma bateria convencional e um sistema híbrido.

Tabela 12 – Comparação entre uma bateria convencional e um sistema híbrido em testes de campo em veículo comercial (Liu *et al.*, 2008).

	<b>Bateria convencional</b>	<b>Sistema híbrido</b>
<b>Especificação</b>	180 Ah / 24 V	Bateria 100 Ah / 24 V Capacitor 32 F / 28 V
<b>-28 °C</b>	Sucesso	Sucesso
<b>-34 °C</b>	Falha	Sucesso
<b>Peso</b>	84 kg	52 kg

O desempenho do sistema híbrido foi bom em todas as condições de operação do motor, especialmente em ambientes frios. Além disso, o sistema híbrido reduziu em 38% do peso do sistema comparado com as baterias.

#### **4.7 Instabilidade de combustão durante a partida a frio**

A instabilidade de combustão do motor Diesel durante o período de partida a frio é um fenômeno onde um ciclo de queima de combustível é seguido por um, dois, três ou mais ciclos em que a queima não ocorre e este padrão deve ocorrer seguidamente. A instabilidade de combustão aumenta sob temperaturas ambiente mais baixas.

A existência da instabilidade de combustão causa um grande problema na partida a frio, especialmente sob condições de ambiente muito frio. Parte do combustível injetado durante os ciclos onde não ocorre a queima é acumulada dentro da câmara de combustão. Quando ocorre um próximo ciclo de queima, uma grande quantidade do combustível acumulado é emitida pelo

escapamento como emissão de fumaça branca devido à combustão incompleta. O tempo para o motor atingir uma velocidade de marcha lenta estável será mais extenso devido à hesitação da velocidade do motor, ou no pior caso, o motor não consegue atingir uma velocidade de marcha lenta auto-sustentável e ocorre a falha na partida. Outro problema associado com a partida a frio é a emissão do produto de oxidação parcial que causa um odor indesejável.

A redução ou eliminação dos ciclos de não queima de combustível é um dos pontos-chave para reduzir ou eliminar a fumaça branca durante a partida a frio. Em baixas temperaturas ambiente é comum que o início do primeiro ciclo de queima não signifique que o motor terá a queima no próximo ciclo e acelerará uniformemente. A instabilidade de combustão não ocorre em função do combustível.

A falha na combustão pode ser causada pela inabilidade da fonte de autoignição para queimar a mistura à sua volta pela diluição da troca com os resíduos do ciclo de queima anterior, ou se a combustão é incapaz de fornecer potência suficiente para o motor vencer as perdas por atrito. Um importante achado na análise de diagramas de pressão em partida a frio é que a falha de combustão é intermitente, com as condições específicas intra-cilindro durante um ciclo afetando (positivamente ou negativamente) o próximo ciclo, e levando a uma série de ciclos de queima e não-queima como ilustrado na Figura 46.

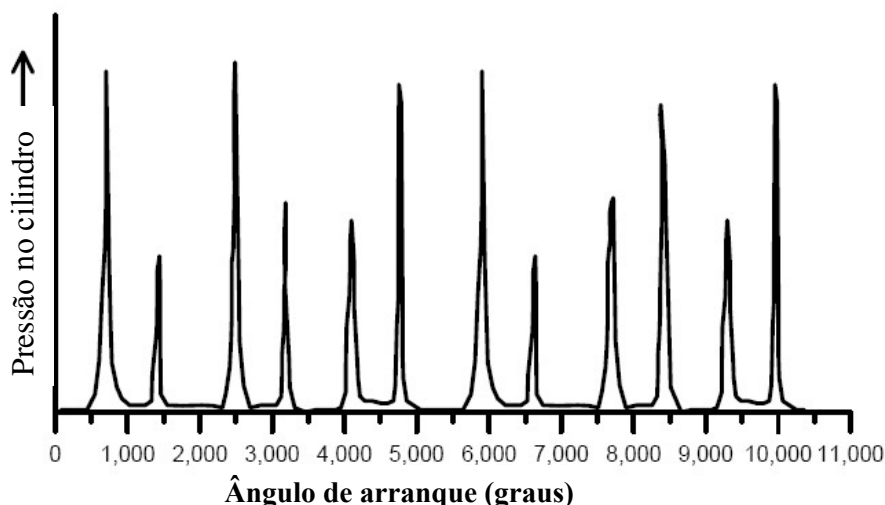


Figura 46 – Instabilidade de combustão típica na partida a frio de um motor Diesel (Rakopoulos e Giakoumis, 2009).

Este comportamento é resultado de um desbalanceamento entre a dinâmica do motor e a cinética da combustão. Em outras palavras, a alta taxa de aceleração após um ciclo de queima reduz o tempo disponível para os processos físicos e químicos serem completos antes do ponto morto superior. Da mesma forma, depois de um ciclo de não-queima, a velocidade de rotação do motor diminui permitindo maior tempo para a pré-ignição das reações químicas próximo ao ponto morto superior, favorecendo então a ignição nos próximos ciclos. Ao mesmo tempo, o aumento gradual na temperatura da parede do cilindro e do lubrificante diminui o problema do aquecimento e as perdas por atrito. Além disso, qualquer quantidade de combustível não queimado depositado no cilindro após um ciclo de não-queima aumenta tanto a razão ar-combustível quanto a taxa de compressão do ciclo bem sucedido e promove reações de chama fria que deverão favorecer a queima no ciclo seguinte.

A Figura 47 ilustra os mecanismos primários que são responsáveis pela falha de combustão durante a partida a frio de um motor Diesel.

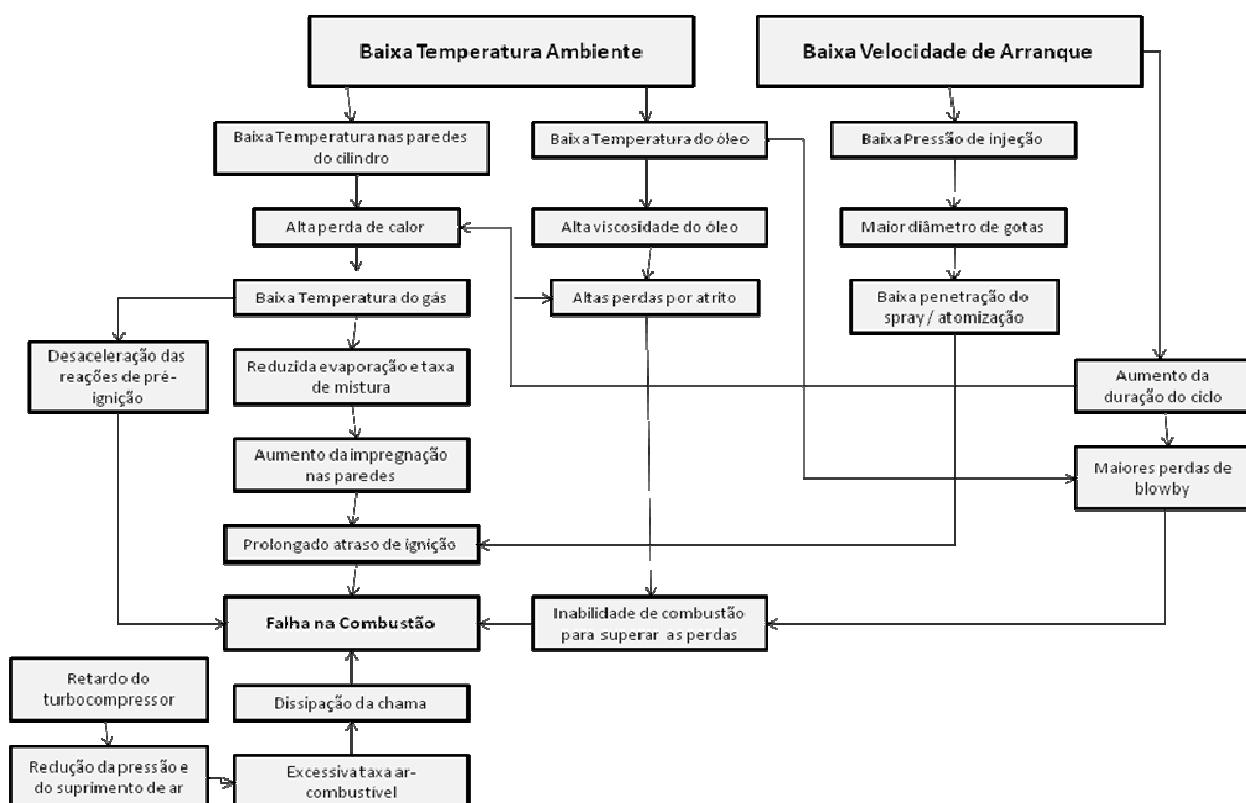


Figura 47 – Mecanismos de falha de combustão durante a partida a frio do motor Diesel

(adaptado de Rakopoulos e Giakoumis, 2009).

## 4.8 Emissões

O modo de operação do veículo pode ser dividido em condições estabilizadas, em partida a frio ou em partida a quente, de acordo com a temperatura do motor. Ainda, o veículo pode operar em aceleração, em desaceleração, em velocidade constante ou parado.

A partida a frio refere-se ao período inicial de funcionamento do veículo, onde o motor ainda não atingiu a temperatura de operação. As emissões veiculares em partida a frio, normalmente, são maiores do que as emissões em condições estabilizadas de operação.

As emissões veiculares são estimadas através de modelos de emissões estáticos ou dinâmicos. Os modelos dinâmicos, normalmente, são modelos complexos que necessitam grande quantidade de parâmetros de entrada, e realizam análises detalhadas através de dados desagregados de tráfego e de emissão. Os modelos estáticos são modelos simples de estimativa de emissões, que utilizam um número reduzido de informações. Geralmente, as informações para estes modelos correspondem a variáveis agregadas de tráfego e de emissões. Estes modelos desconsideram alguns efeitos formadores de emissão veicular, como o efeito da partida a frio.

Como a partida a frio exerce influência na quantidade de emissões totais, deve-se entender qual o percentual das emissões totais é devido ao adicional de emissões nesse modo de operação.

Segundo Hansen (2008), a emissão de poluentes devido a partida a frio não varia linearmente com o tempo, mas de maneira semelhante a uma curva logarítmica. Assim, a emissão por partida a frio nos primeiros instantes é bem maior, se comparada com o período próximo às condições estabilizadas.

A partir de um gráfico de emissão continua de poluentes de um determinado veículo ao longo da distancia percorrida, é possível verificar o comportamento da emissão de poluentes. A emissão de poluentes vai diminuindo durante o início da viagem, conforme a temperatura do motor aumenta, até atingirem as condições estabilizadas de operação do veículo. A Figura 48 ilustra o comportamento da emissão de poluentes ao longo da distancia percorrida.

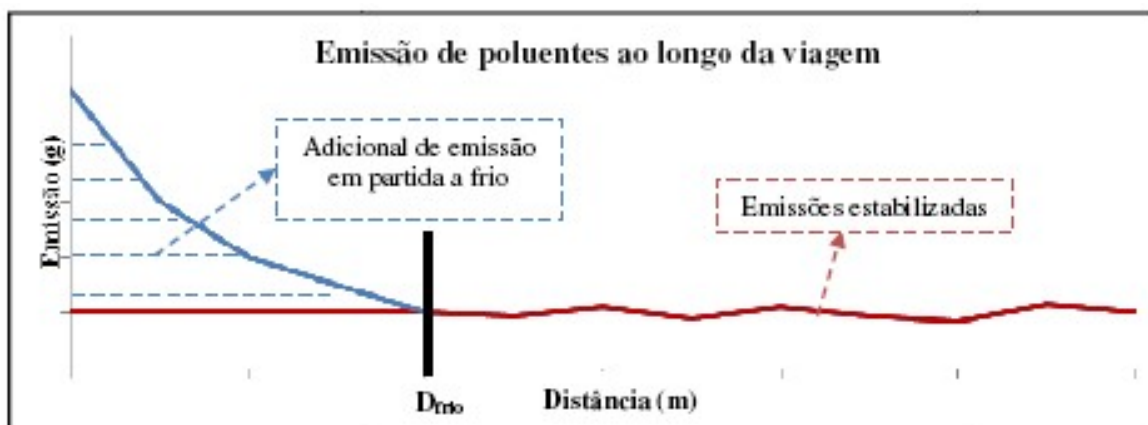


Figura 48 – Emissão veicular ao longo da viagem (André e Joumard, 2005).

A distância necessária para estabilizar as emissões é chamada de distancia de partida a frio ( $D_{frio}$ ). A análise das emissões veiculares também pode ser realizada em função do tempo, assim, o período em que o veículo trafega até atingir as condições estabilizadas é chamado de tempo de partida a frio ( $t_{frio}$ ).

A representação das emissões em partida a frio através de um fator de emissão total mascara a distribuição da emissão por partida a frio ao longo da viagem, pois esta última ocorre apenas nos instantes iniciais da viagem. Através desta representação, as emissões veiculares são subestimadas, durante a distância de partida a frio ( $D_{frio}$ ), e superestimadas, no restante da viagem. Representar as emissões por partida a frio e as emissões estabilizadas de forma separada é uma maneira de aprimorar a distribuição das emissões ao longo das viagens. A Figura 49 ilustra a representação da estimativa de emissões totais com fatores de emissão desagregados, divididas em emissão estabilizada, representada pelos retângulos de cor laranja e vermelha, e adicional por partida a frio, representado pelo retângulo de cor azul.

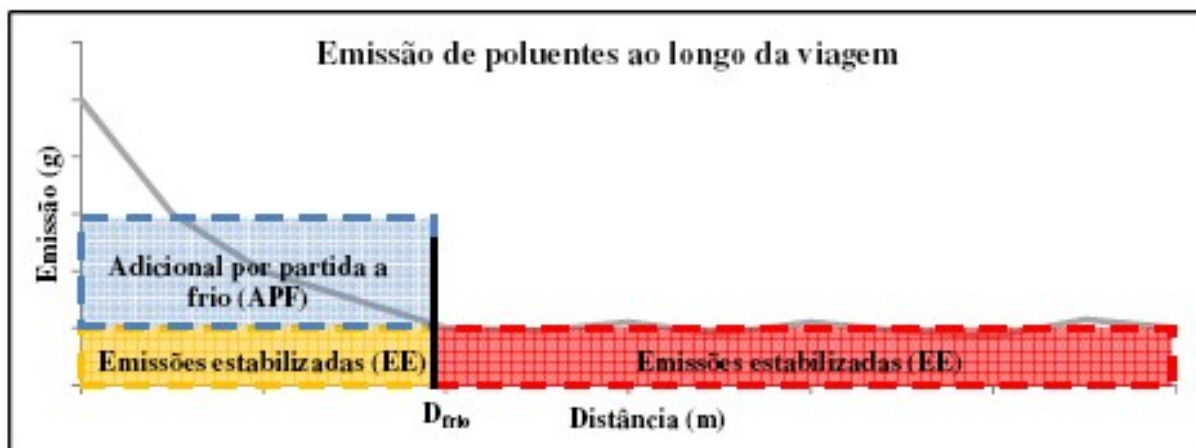


Figura 49 – Estimativa de emissão de poluentes de forma desagregada (André e Joumard, 2005).

O enriquecimento da mistura ar-combustível, necessária para uma correta partida a frio e operação transiente a frio são a principal razão do aumento das emissões de CO e HC durante a partida a frio e fase de aquecimento. Quando a temperatura de condicionamento do motor diminui, as emissões de CO e HC aumentam proporcionalmente (Bielaczyc e Merkisz, 1998).

Uma estratégia comum de redução de HC e CO durante o aquecimento do motor é ativar a vela aquecedora por certo tempo após o motor ter partido. A tecnologia de aquecimento do ar de admissão também permite melhoria na combustão na fase de aquecimento do motor. Para comprovar isto, Payri *et al.* (2006) estudaram o benefício em emissões durante o ciclo de direção europeu (MVEG) e os benefícios foram determinados em comparação com os resultados obtidos com o uso de velas aquecedoras.

As Figuras 50 e 51 mostram a evolução da concentração instantânea das emissões de HC e CO no catalisador durante o ciclo de direção urbano (*Urban drive cycle – UDC*), fase do ciclo de direção europeu.



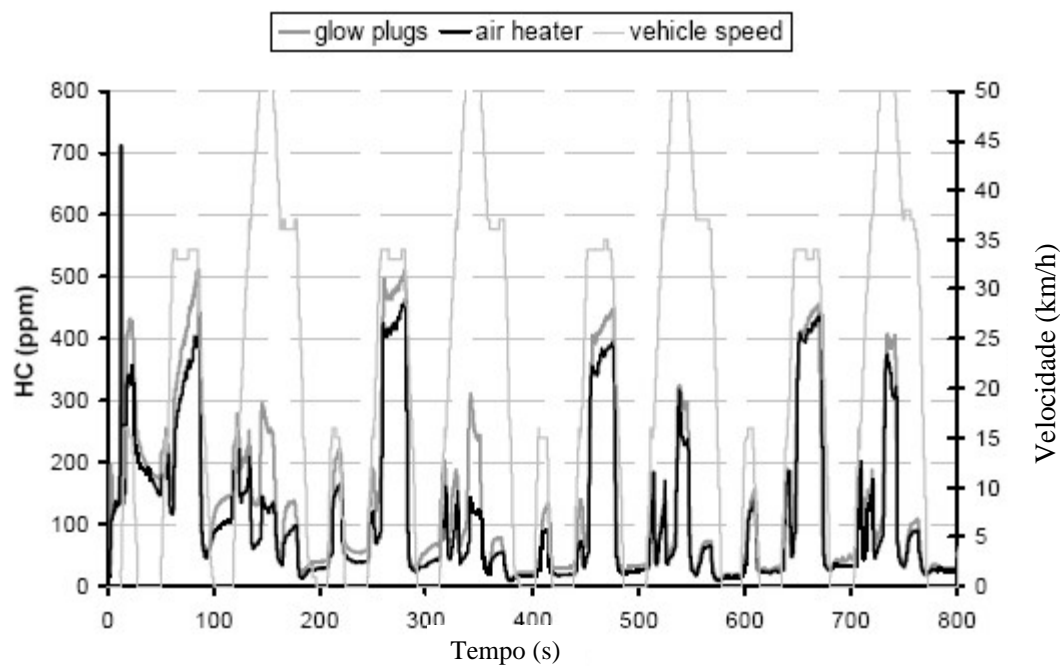


Figura 50 – Evolução das emissões de HC durante a fase UDC do ciclo de direção europeu (Payri *et al.*, 2006).

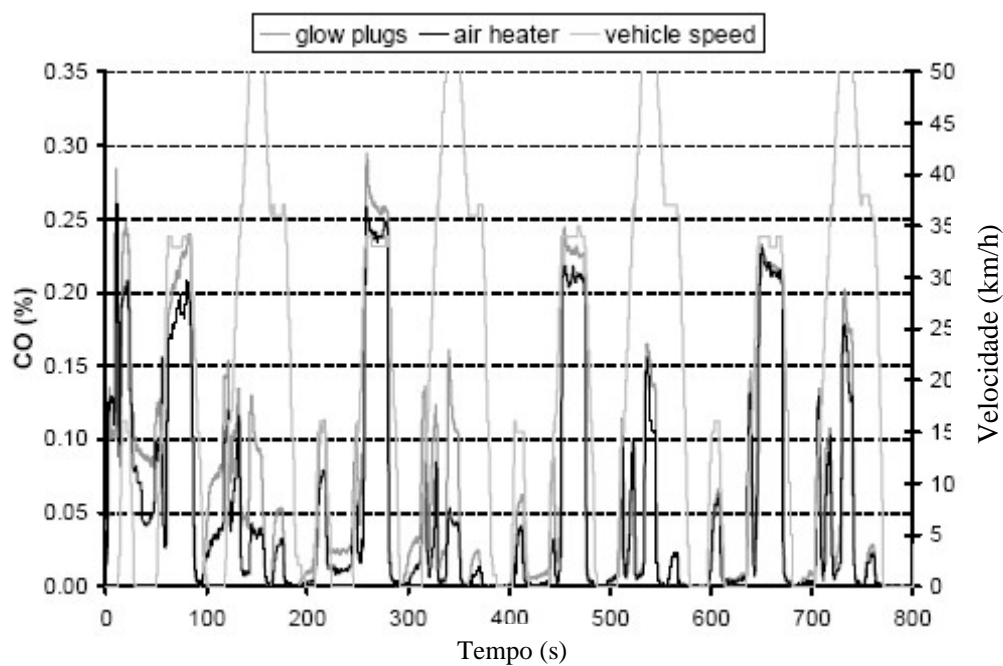


Figura 51 – Evolução das emissões de CO durante a fase UDC do ciclo de direção europeu (Payri *et al.*, 2006).

Em ambas as figuras pode-se observar que há um benefício nas emissões quando o aquecedor do ar é aplicado. Além disso, fica claro que ambas as emissões são mais importantes no início do ciclo devido à baixa temperatura na câmara de combustão.

Os resultados de emissões de NO<sub>x</sub> e particulado (PM) mostraram uma piora em ambas emissões com o contínuo aquecimento do ar. Finalmente, na Figura 52 as diferenças das emissões acumuladas dos quatro agentes durante o ciclo MVEG são apresentadas.

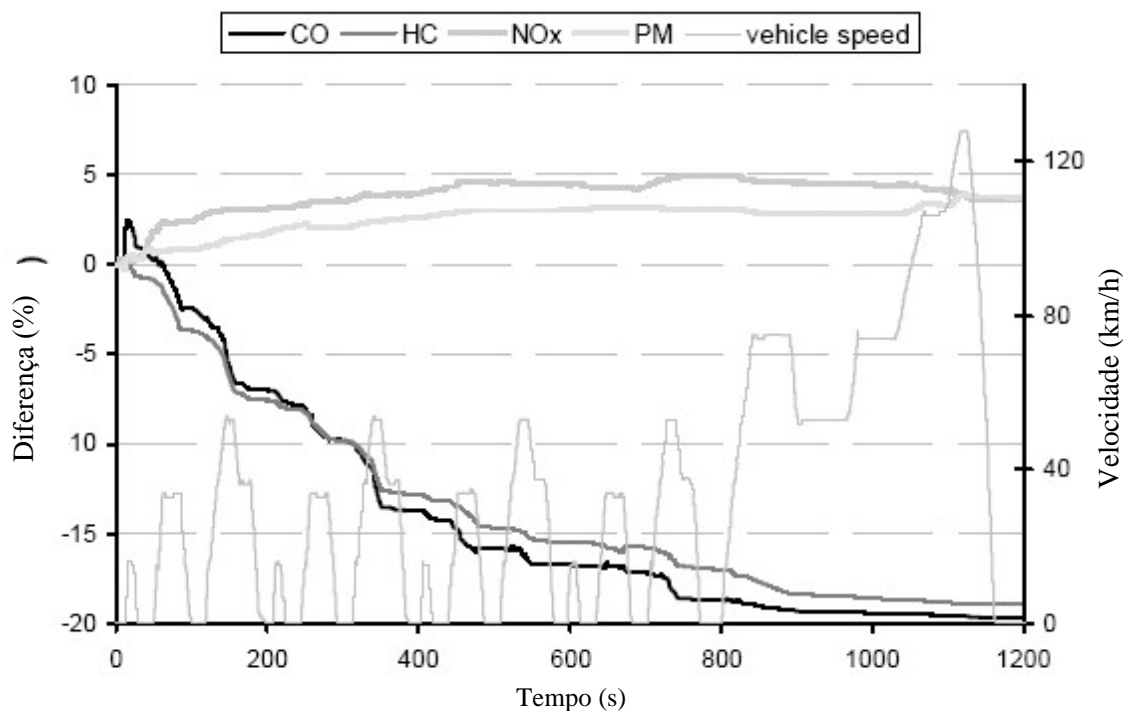


Figura 52 – Diferenças entre HC, CO, NO<sub>x</sub> e PM acumulados durante o ciclo MVEG (Payri *et al.*, 2006).

O aquecimento do ar melhorou a combustão piloto e consequentemente a injeção principal foi reduzida. Isto causou uma redução significativa no nível de ruído de combustão (cerca de 3 dB). Reduções em emissões de fumaça branca após a partida do motor também foram observadas em testes realizados por Mann *et al.* (1999). A Figura 53 mostra que a -20 °C o tempo necessário para a opacidade cair abaixo de 10% é reduzido de 120 segundos para menos que 20 segundos através do uso de componente auxiliar de partida (neste caso, um aquecedor do ar de admissão).

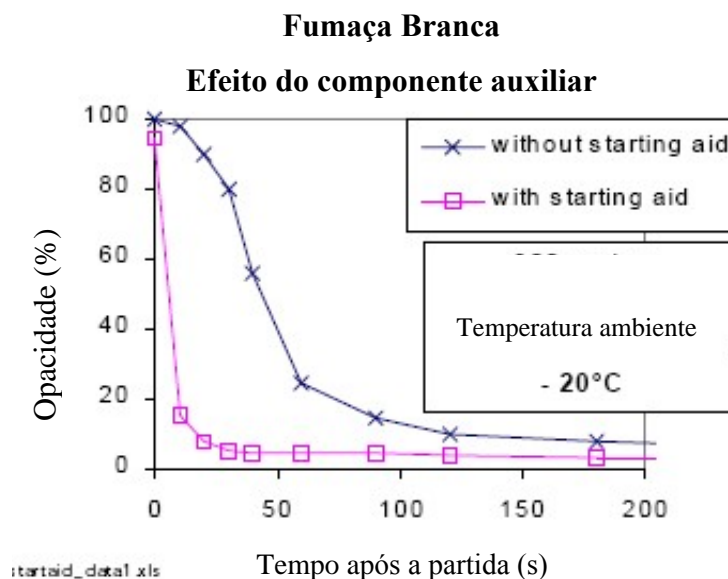


Figura 53 – Efeito do componente auxiliar de partida sobre a emissão de fumaça branca em motor de 4,45 l, 4 cilindros (Mann *et al.*, 1999).

A prática de injeção de combustível em excesso para diminuir a mínima temperatura de partida a frio, tem a desvantagem de que o combustível encontrado nos cilindros durante o arranque e os produtos da combustão incompleta durante os primeiros ciclos de partida produzirão fumaça que, em algumas aplicações não são aceitáveis em termos de poluição ambiental (Biddulph e Lyn, 1966-1967).

### **Emissões de gases da exaustão pelas diferentes misturas de BioDiesel**

Randazzo (2009) analisou as emissões de gases de exaustão com as misturas de BioDiesel e verificou que com o aumento do conteúdo de BioDiesel na mistura com o óleo Diesel ocorreu um aumento nas emissões de CO<sub>2</sub>. Para concentrações de BioDiesel de até 20% na mistura com o óleo Diesel mineral as emissões de monóxido de carbono apresentaram pouca variação. Uma ligeira tendência de redução nas emissões de hidrocarbonetos foi observada à medida que a concentração de BioDiesel em óleo Diesel aumenta, até o limite de 20%. As emissões de óxidos de nitrogênio foram ligeiramente aumentadas para as misturas contendo concentrações moderadas de BioDiesel (B10 e B20). Com o aumento da concentração de BioDiesel na mistura, menor emissão de material particulado foi verificada.

#### 4.8.1 Determinação do adicional de emissões em partida a frio

O método de determinação do adicional de emissões por partida a frio descrito por Hansen (2008) é composto de sete etapas. A Figura 54 ilustra as etapas necessárias para a determinação do adicional por partida a frio.

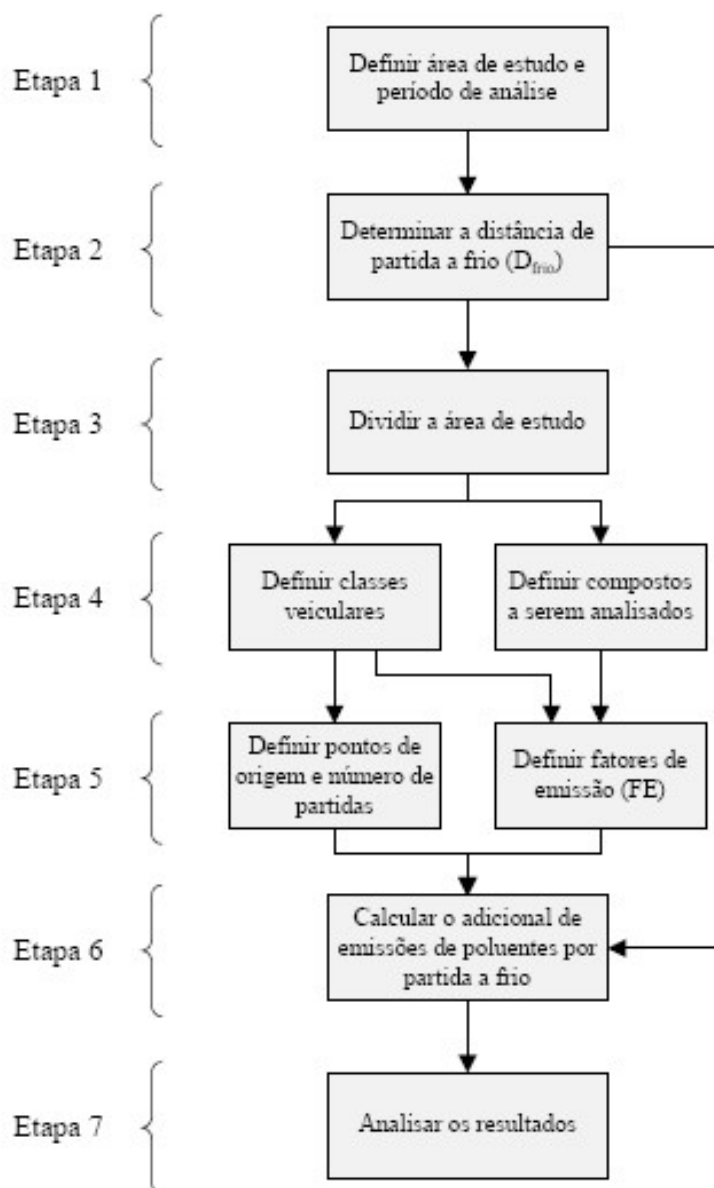


Figura 54 – Fluxograma do método para determinação do adicional de emissões por partida a frio definido por Hansen (2008).

Etapa 1 – Delimitar a área de estudo e o período de análise - A principal região afetada pelo adicional de emissões por partida a frio é a área urbana. A escolha da área de estudo dentro da região urbana envolve a análise da concentração das viagens iniciadas com partida a frio (Hansen *et al.*, 2007), pois regiões que possuem maior número de viagens iniciadas com veículos em partida a frio possuem maior potencial de emissão de poluentes. Assim como a área de estudo, o período de análise é definido pelo horário em que ocorre maior número de viagens em partida a frio.

Etapa 2 – Determinar a distância de partida a frio - A distância de partida a frio ( $D_{\text{frio}}$ ) é determinada em medições de emissões a bordo de veículos em tráfego real ou em dinamômetros de chassis. Essa distância é medida quando as emissões de escapamento se estabilizam, variando apenas em eventos de aceleração. É importante ressaltar que a distância em partida a frio pode também ser obtida em função do tempo de partida a frio e da velocidade média na área de estudo, quando o dado disponível é referente apenas ao tempo de partida a frio.

Etapa 3 – Dividir a área de estudo em células de análise - O método proposto sugere a divisão da área de estudo em células de análise para a distribuição espacial do adicional por partida a frio e identificação de regiões com maiores adicionais de emissão nesse tipo de partida. As células de análise são de formato quadrado e o tamanho é determinado em função da distância média que o veículo percorre até atingir as condições estabilizadas.

Etapa 4 – Determinar as classes de veículos e os compostos a serem analisados - Cada veículo possui um fator de emissão que pode variar em função da tecnologia empregada na produção do motor, equipamentos de controle de emissão de poluentes, potência do motor, tipo de combustível, frequência e tipo de manutenção realizada, idade e quilometragem acumulada do veículo. Por isso, é conveniente classificar os veículos de acordo com suas características, agrupando-os em classes que correspondam aos fatores de emissão similares. A análise do adicional de emissões por partida a frio é realizada para as diferentes classes de veículos.

São comumente quantificados os poluentes que possuem regulamentação, como o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC) e os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), o gás de efeito estufa  $\text{CO}_2$  e o material particulado (MP). Para veículos com motores ciclo Diesel, os principais poluentes emitidos são  $\text{NO}_x$  e MP.

Etapa 5 – Determinar pontos de origem, número de partidas a frio e fatores de emissão - A emissão por partida a frio ocorre no início da viagem. Assim, a determinação dos pontos de origem e do número de partidas a frio envolve a utilização de dados geo-referenciados sobre os locais onde são iniciadas as viagens por veículos motorizados. A partir desses dados é possível alocar os pontos de origem em cada célula de análise e então contar quantas partidas a frio ocorre em cada célula. Os fatores de emissão representam a quantidade média de poluentes que uma categoria de veículo emite em uma determinada distância percorrida.

Etapa 6 – Calcular o adicional de emissões por partida a frio - O adicional de emissões por partida a frio é determinado através do fator de emissão do adicional por partida a frio ( $FE_{APF}$ ), número de partidas a frio e a distância de partida a frio. A estimativa do adicional de poluentes em partida a frio é obtida através da equação 9.

$$APF_{ij} = FE_{APFij} * N_{PFj} * D_{frio} \quad (9)$$

Onde:

$APF_{ij}$  = Adicional por partida a frio do poluente  $i$  emitido pela classe veicular  $j$  (g).

$FE_{APFij}$  = Fator de emissão do adicional por partida a frio da classe veicular  $j$  para o poluente  $i$  (g/km);

$N_{PFj}$  = Número de partidas a frio da classe  $j$  (viag);

$D_{frio}$  = Distância de partida a frio (km/viag).

O adicional de emissões por partida a frio é determinado individualmente para cada viagem, de acordo com o fator de emissão correspondente à classe veicular, e agrupado nas células de análise.

Etapa 7 – Analisar os resultados - A avaliação das emissões por partida a frio compreende três análises. As análises são realizadas para cada período de estudo e tipo de poluente, e englobam a divisão das emissões veiculares em função da classe veicular.

Comparação do adicional por partida a frio nas células de análise: Nesta comparação são identificadas as células com maiores emissões provenientes da partida a frio e o quanto cada célula representa no total das emissões por partida a frio.

Comparação do adicional de emissões por partida a frio com as emissões totais: Nessa análise, verifica-se quanto o adicional por partida a frio é representativo nas emissões veiculares totais. A estimativa das emissões totais é realizada de maneira estática, através da soma das emissões estabilizadas e do adicional por partida a frio.

Análise de sensibilidade: Essa análise pressupõe alterar valores de um dado de entrada particular e, então, avaliar o respectivo impacto nos parâmetros de saída de interesse, no caso as emissões de CO, HC, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>. Nessa análise, verifica-se a influência da tecnologia veicular nas emissões de poluentes.

A viabilidade de aplicação deste método exige a utilização de variáveis representativas das emissões veiculares e do perfil de partidas a frio na área em análise.

#### **4.8.2 Emissões a frio em marcha lenta**

A expressão “marcha lenta” refere-se a continua operação do motor enquanto o veículo está parado. Longos períodos em marcha lenta de veículos Diesel devem causar um impacto ambiental adverso e ser uma fonte adicional significativa, e por vezes desnecessária, de consumo de combustível. Em climas mais frios, os motores são frequentemente deixados na condição de marcha lenta – por exemplo, durante o carregamento e descarga de cargas – para prevenir potenciais problemas de partida.

Longos períodos em marcha lenta de motores Diesel podem proporcionar diversos impactos negativos no meio ambiente e economia, tais como:

- Consumo de combustível e a emissão de dióxido de carbono,
- Emissões de poluentes regulados (NO<sub>x</sub>, PM, HC, CO) e não regulados,
- Aumento dos custos de manutenção do motor e redução da vida útil do motor,
- Comprometimento a saúde,
- Elevação dos níveis de ruído.

A temperatura ambiente pode ter um significativo impacto nas emissões e consumo de combustível em marcha lenta. Dependendo da localização do resfriador de óleo lubrificante, menores temperaturas ambiente podem significar que a temperatura do óleo do motor será menor

e o atrito do motor maior devido ao aumento da viscosidade do óleo. Com uma menor temperatura da câmara de combustão, maiores quantidades de combustível são necessárias para que a queima supere o maior atrito em baixas temperaturas. Todos estes efeitos devem impactar os parâmetros de combustão e emissões. A temperatura do sistema de escape também deverá ser menor e deve proporcionar um impacto adicional em emissões.

Menores temperaturas ambiente podem também elevar as emissões de material particulado. Emissões de PM em marcha lenta são principalmente compostos de carbono orgânico, a maioria oriunda do óleo lubrificante (Sakurai *et al.*, 2003). Menores temperaturas de óleo são associadas ao aumento da quantidade de óleo lubrificante existente dentro da câmara de combustão resultando no aumento do consumo de óleo (Cho e Tian, 2004). Este efeito poderia contribuir para o aumento da emissão de PM em baixas temperaturas.

Emissões de particulado de motores Diesel são compostos predominantemente de carbono primário (EC) e carbono orgânico (OC). A fração primária origina-se da pirólise (decomposição de substância química através do calor) das gotas de combustível, enquanto que a fração orgânica origina-se do combustível não queimado, óleo lubrificante e subprodutos da combustão.

Isto pode ser ilustrado pelas medições de carbono primário e orgânico (EC e OC) de dois diferentes estudos que os caracterizaram em marcha lenta em diferentes caminhões pesados. Um estudo fez a caracterização de condições de partida com o motor frio em condições de clima de verão (Shah *et al.*, 2004) e outra em condições de partida a quente (Clark e Gautam, 2005). Resultados estão resumidos na Figura 55.

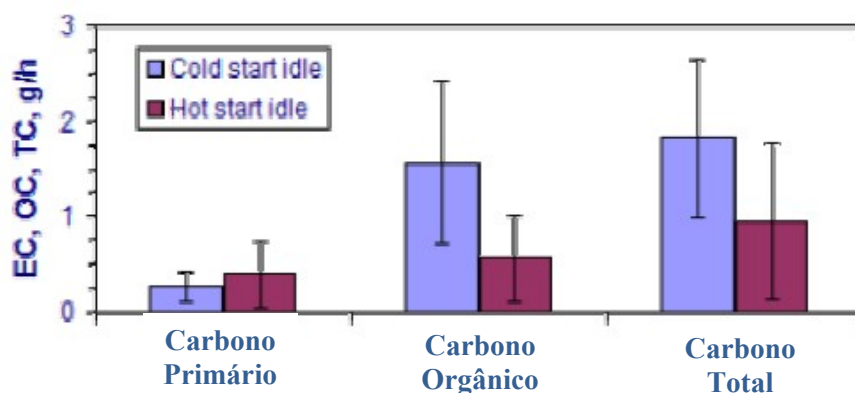


Figura 55 – Emissões em marcha lenta de carbono primário, carbono orgânico e carbono total (Dieselnet, 2011).



Resultados de partida a frio coletados imediatamente após um motor frio partir em condições de clima de verão. Resultados de partida a quente coletados após o motor ter atingido a temperatura de operação. Barras de erro representam o desvio padrão.

Os resultados mostram que o aumento das emissões de PM em marcha lenta de um motor em baixa temperatura é obtido quase que inteiramente devido ao aumento do carbono orgânico – muito provavelmente do óleo lubrificante. Não há uma diferença estatística significativa no carbono primário.

O aumento do consumo de combustível pode ser explicado pelo aumento do atrito do motor devido a mais baixa temperatura do óleo. As emissões de CO aumentam em baixas temperaturas como resultado de uma menor temperatura intra-cilindro e/ou mudanças da pré mistura da combustão. O aumento das emissões de PM é resultado do aumento da emissão de carbono orgânico. NO<sub>x</sub> também aumenta em baixas temperaturas devido ao efeito da menor umidade do ar de admissão em baixas temperaturas.

#### **4.9 Consumo de combustível**

O aumento das emissões de CO e HC durante a partida e aquecimento são acompanhados pelo aumento do consumo de combustível, causado, entre outras coisas pelo aumento das perdas por atrito no interior do motor e o enriquecimento da mistura de combustível para uma correta partida e aquecimento do motor. Baseado nisto, para que haja um controle das emissões em partida a frio e o controle do consumo de combustível, os motores devem considerar o uso de dispositivos para aquecer o ar admitido e melhorar a atomização do combustível de modo a reduzir o enriquecimento da mistura ar-combustível nestas fases do motor (Bielaczyc e Merkisz, 1998).

Van Basshuysen e Schaefer (2004) ressaltam que a duração da injeção de combustível exerce um impacto significativo sobre o consumo de combustível, além de efeitos de tensões mecânicas nos componentes do motor, ruído de combustão e emissões de poluentes. Os componentes do sistema de alimentação (bombas de alta pressão e injetores, por exemplo) asseguram a quantidade de combustível injetado dentro de certo período de tempo.

A duração da injeção é compreendida pelo início da injeção e o término da mesma, ocorrendo neste intervalo a ignição. A diferença entre o início da injeção e a ignição é definida como o atraso de ignição. Portanto, o atraso de ignição em um motor Diesel é o tempo requerido após o início da injeção de combustível para o processo de ignição produza os núcleos da chama na câmara de combustão e uma combustão detectável. Em função das condições existentes no motor, no que diz respeito à injeção de combustível, o atraso de ignição é cerca de 2 ms.

De modo a possibilitar uma otimização física e química do processo de combustão da mistura, é desejável um reduzido atraso de ignição de modo que ocorra um moderado aumento da pressão e da temperatura na câmara de combustão após a ignição, além de reduzir a quantidade de combustível injetada. O aumento do atraso de ignição gera uma maior troca térmica entre as paredes do cilindro e da mistura, favorecendo ignições localizadas com consequente combustão incompleta, aumento no consumo específico e formação de fuligem (Basshuysen e Schaefer, 2004; Khair e Jaaskelainen, 2010).

Segundo van Basshuysen e Schaefer (2004), um curto atraso de ignição é gerado por influências físicas e químicas. As influências físicas são exercidas por elevada temperatura e pressão do gás na câmara de combustão no início da injeção de combustível, forte atomização do combustível e elevadas velocidades relativas do combustível e do ar. As influências químicas são estabelecidas por elevada ignibilidade do combustível (elevado número de cetano), elevada temperatura do combustível, elevada pressão e temperatura do gás no início da injeção.

#### **4.10 O uso de novas tecnologias**

Os requisitos para diminuir as emissões, melhorar a partida a frio e a contínua demanda de economia de combustível levaram a indústria automobilística a avanços tecnológicos, incorporando a eletrônica e a tecnologia de manufatura. Injetores de combustível eletronicamente controlados possibilitaram o aumento do limite de pressão de combustível injetada. A rápida mistura promovida pela alta velocidade do spray de combustível possível devido ao aumento da pressão de injeção proporcionaram uma menor formação de particulado e o retardo no tempo de injeção proporcionou uma redução dos níveis de  $\text{NO}_x$ .

A introdução do sistema de injeção *common rail* para aplicações comerciais de pequeno e médio porte permitiram uma maior flexibilidade nas estratégias de injeção de combustível. Estes sistemas permitem múltiplas injeções dentro de um único ciclo do motor. Uma estratégia comum é iniciar a combustão com duas breves injeções (chamadas de injeção piloto e pré) que produzem um ambiente no cilindro em que quando a injeção principal ocorre, o atraso de ignição é menor e a produção de  $\text{NO}_x$  é reduzida. Estas breves injeções também reduzem o ruído e a vibração do motor. Imediatamente após a injeção principal, uma pequena quantidade de combustível é injetado para auxiliar na oxidação das partículas de fuligem.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Partidas a frio são todos os procedimentos de partida em que o motor e o meio não estão na temperatura de operação. Quanto menor a temperatura, piores as condições para uma rápida ignição e uma completa combustão. Para garantir que a partida não levará um tempo exagerado em baixas temperaturas, componentes auxiliares são utilizados para dar suporte à partida a frio. Estes componentes compensam as condições pobres de partida e iniciam a ignição para uma combustão estável. Os componentes auxiliares de partida a frio são essenciais não somente para uma partida do motor a frio bem sucedida, como também para melhorar seu desempenho e emissões de poluentes sob temperaturas negativas.

O estudo mais aprofundado sobre o tema proporcionará a determinação correta da aplicação de cada componente auxiliar de acordo com a mínima temperatura de partida requerida pelo motor.

Os requisitos elétricos do aquecedor do ar de admissão são absolutamente compatíveis com a capacidade do sistema elétrico de qualquer veículo.

Os dados levantados e a discussão apresentada encorajam a realização de futuros trabalhos considerando o aquecedor do ar de admissão como uma alternativa para superar as dificuldades intrínsecas no desenvolvimento de motores mais modernos.

O principal objetivo no aquecimento do motor em temperaturas muito baixas é elevar a temperatura do equipamento o suficiente para obter uma partida bem sucedida. A importância de um adequado dimensionamento do motor para operação em baixas temperaturas está em reduzir a quantidade de calor necessário para aquecer o motor suficientemente para a partida.

Não existe uma regra que governa a escolha dos aquecedores uma vez que cada motor tem seus diferentes requisitos dependendo do seu tamanho, configuração, condição, lubrificantes, ambiente, grau de isolamento, etc. Deve-se então também levar em conta o aspecto econômico, fazendo a escolha dos componentes auxiliares mais adequados, beneficiando os custos com a aquisição do aquecedor (melhor custo benefício entre o aquecedor mais adequado a aplicação e o aquecedor com especificação mais facilmente encontrada no mercado), e o menor consumo tanto da bateria do veículo, como também da energia elétrica da rede.

Devido à sua eficiência e durabilidade, os motores Diesel estabeleceram-se como a fonte preferencial de potência para veículos comerciais. Com legislações cada vez mais severas, o maior desafio do desenvolvimento do Diesel é a contínua redução das emissões de escape. Como a grande maioria do Diesel é queimado em motores aquecidos operando em climas temperados, os procedimentos de teste de emissões da legislação refletem o uso em condições similares de operação. Para temperaturas baixas, o projeto do motor e as propriedades do combustível tornam-se mais críticos, especialmente durante os primeiros minutos de operação quando o motor ainda está frio. Entretanto, o motor gasta muito pouco tempo sob condição fria, então quaisquer medidas tomadas para melhorar o desempenho a frio não devem afetar o desempenho de forma adversa sob condições de motor aquecido, ou adicionar custos que não se justifiquem para a maioria do tempo operacional do veículo.

Apesar do líquido de arrefecimento manter-se fluido sob temperaturas negativas, a temperatura do mesmo torna-se crítica no sentido de proporcionar a partida do motor sob esta condição. Por esta razão, existe a necessidade da aplicação de um adequado aquecedor do líquido de arrefecimento atuando enquanto o motor está desligado, fazendo com que os componentes do motor mantenham-se aquecidos, ou seja, em condições mais favoráveis no momento da partida.

Observa-se que a influência da partida a frio tem grande representatividade nas emissões, especialmente em áreas urbanas. Conforme visto, as emissões veiculares sofrem influência de diversos fatores como, o tipo de motor, a presença de dispositivos de controle de emissões, a temperatura ambiente, entre outros.

A estimativa de emissões veiculares pode ser realizada através de modelos de emissões. De forma geral, esses modelos podem ser classificados em estáticos e dinâmicos. Modelos dinâmicos normalmente possibilitam uma análise mais detalhada das emissões veiculares distribuídas em toda a rede viária. Entretanto, esses modelos necessitam de um volume de informações elevado, muitas vezes indisponíveis, e sua aplicação para grandes áreas é limitada.

Já os modelos de emissões estáticos utilizam variáveis agregadas e são apropriados para análises em maior escala. Porém, esses modelos normalmente desconsideram o efeito da partida a frio. No entanto, quando esse aspecto é considerado, o efeito da partida a frio é distribuído ao longo de toda a viagem, distorcendo a distribuição espacial das emissões totais.

De acordo com o estudo feito, conclui-se que ainda são necessárias intervenções para a redução das emissões de poluentes durante o período que o veículo opera em partida a frio.

Medidas tecnológicas podem contribuir para a redução de emissões em partida a frio como a utilização de componentes/equipamentos para pré-aquecer ou promover o aquecimento acelerado do motor.

Medidas comportamentais também geram contribuição como, por exemplo, evitar acelerações que demanda grande potência do motor no período subsequente a partida a frio e o uso de veículos aquecidos mesmo quando os componentes auxiliares de partida a frio não são requeridos para uma partida bem sucedida.

Medidas Regulatórias: exemplos de medidas regulatórias incluem a implantação de programas de inspeção e manutenção veicular, e redução de limites máximos de emissões veiculares. Ainda, para a redução das emissões em partida a frio, pode-se considerar a imposição de limites máximos de emissões para o período inicial de operação do veículo, tendo em vista que as emissões nesse período têm grande representatividade nas emissões totais de poluentes dos veículos mais novos.

Sem qualquer padrão existente, é a realimentação do cliente final que justifica o trabalho realizado pelos fabricantes de veículos e motores em termos de operação a frio. O tempo de partida, a estabilidade em marcha lenta, ruído e emissão de fumaça são os principais assuntos relacionados à operação a frio que precisam ser investigados. Muitos trabalhos foram conduzidos em torno destes temas, porém as emissões com o motor frio não foram estudados em detalhe. Sabe-se que a operação a frio forma poluentes como HC e CO adicionado a fumaça branca. Os gases de escape emitidos sob operação a frio contem poluentes como HC, fuligem e NO<sub>x</sub> e também produtos não poluentes como a água. As técnicas de medições atuais para caracterizar a emissão de fumaça (por exemplo, com um opacímetro) são bastante limitadas e fornece somente respostas aproximadas.

Portanto, a melhor compreensão e caracterização da operação a frio proporcionarão avanços no desenvolvimento e aperfeiçoamento dos motores Diesel no que diz respeito ao tempo de partida, estabilização bem como as emissões. Estes estudos impactarão o desempenho e emissões do motor e mostrarão o potencial de novas tecnologias e de estratégias adequadas a operação em baixas temperaturas.

O estudo da literatura serviu para avaliar o estado da arte e os trabalhos realizados com respeito a partida e operação a frio (critérios e metodologias) e entendimento quanto a formação de emissões a frio.

A aplicação de modelos computacionais é uma ferramenta útil de pesquisa. Além disso, faz-se necessário o desenvolvimento de modelos específicos para partida a frio, pois modelos otimizados para partida em condições normais em muitos casos não são apropriados.

A diminuição do consumo de combustível, bem como o ruído e as emissões de poluentes são contra efeitos da otimização do comportamento em partida a frio e fase de aquecimento.

A solução do problema de fluxo a frio do BioDiesel e de suas misturas se encontra, portanto, no desenvolvimento de compostos orgânicos que apresentem as características estruturais adequadas para apresentar um bom desempenho em baixos níveis de aditivação, o que requer muito esforço de pesquisa e investimento neste setor.

## Referências

- AHN, K.; RAKHA, H.; TRANI, A.; VAN AERDE, M. Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. **Journal of Transportation Engineering**, v. 128, p. 182-190, 2002.
- ANDRÉ, J.M.; JOUMARD, R. **Modeling of cold starts excess emissions for passenger cars**. INRETS report LTE 0509, 2005.
- ARTEMIS – Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems. Disponível em: <<http://www.trl.co.uk/ARTEMIS>>. Acesso em: 5 set. 2007.
- ASOU, Y.; FUJIMOTO, H.; SENDA, J.; TSURUTANI K.; NAGAE, M. **Combustion in a small DI Diesel engine at starting**. SAE paper 920697, 1992.
- ASSANIS, D.N., FILIPI, Z.S.; FIVELAND, S.B.; SYRIMIS, M. A predictive ignition delay correlation under steady-state and transient operation of a direct injection Diesel engine. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 125, n. 2, p. 450-457, 2003.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. Book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2009.
- AUSTEN, A.E.W.; LYN, W.T. **Some investigations on cold starting phenomena in Diesel engines**. Proc. IMechE, Automobile Division, n. 5 (1959-1960).
- BARTH, M.; AN, F.; YOUNGLOVE, T.; SCORA, G.; LEVINE, C.; ROSS, M.; WENZEL, T. **The development of a comprehensive modal emissions model**. Final report to the National Cooperative Highway Research Program, 2000.
- BATES, R.E.; BILELLO, M.A. **Defining the cold regions of the Northern Hemisphere**. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. New Hampshire, Technical Report 178, 1966.
- BEL, S.; KOURIDIS, C.; NTZIACHRISTOS, L. **COPERT 4 - Beta Version Software Description**. Laboratory of Applied Thermodynamics, Mechanical Engineering Department, Aristotle University Thessaloniki, 2005.
- BERU, A.G. **Cold start aids for commercial vehicles**. Technical Information 01, n. 5 100 006 007.



- \_\_\_\_\_. **All about Glow plugs**. Technical Information 04, n. 5 100 006 002.
- BIDDULPH, T.W.; LYN, W.T. **Unaided starting of Diesel engines**. Proc. IMechE, Automobile Division, 181, Pt 2A (1966-1967).
- BIELACZYK, P.; MERKISZ, J. **Cold-start emissions investigation at different ambient temperature conditions**. SAE paper 980401, 1998.
- BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25<sup>a</sup> ed. São Paulo: E. Blücher, 2005. 1232 p.
- BRUNNER, M.; RUF, H. **Contribution to the problem of starting and operating Diesel vehicles at low temperatures**. Proc. IMechE, Automobile Division, n. 5 (1959-1960).
- CAPPIELLO, A. **Modeling traffic flow emissions**. Thesis - Master of Science in Transportation. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, EUA. 2002.
- CARB – California Air Resources Board. EMFAC 2007 version 2.30 – Calculating emission inventories for vehicles in California. User's Guide. 2007.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Proconve**, Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em 20 jun. 2009.
- CHALLEN, B; BARANESCU, R. **Diesel engine reference book**. Oxford: SAE Inc., 1999.
- CHAMPOUSSIN, J.C.; YU, R.; GENTILE, D. **Warm-up of a D.I. Diesel Engine: Experiment and Modeling**. SAE paper 2000-01-0299, 2000.
- CHANDLER, J.; ZECHMAN, J. **Low-temperature operability limits of late model heavy-duty Diesel trucks and the effect operability additives and changes to the fuel delivery system have on low-temperature performance**. SAE paper 2000-01-2883, 2000.
- CHIU, C.; SCHUMACHER, L.G.; SUPPES, G.J. Impact of cold flow improvers on soybean BioDiesel blend. **Biomass Bioenergy**, v. 27, p. 485-491, 2004.
- CHO, Y.; TIAN, T. **Modeling of oil vaporization and transport of the oil vapor in the piston ring pack of internal combustion engines**. SAE paper 2004-01-2912, 2004.
- CLARK, N.N.; GAUTAM, M. **Heavy-duty vehicle chassis dynamometer testing for emissions inventory, air quality modeling, source apportionment and air toxics emissions inventory**. West Virginia University Research Corporation, Project E-55/59 Phase 2 Final Report, 2005.

- CLERC, J.C. **Cetane number requirements of light-duty Diesel engines at low temperatures.** SAE paper 861525, 1986.
- DAVIS, N.; LENTS, J.; OSSES, M.; NIKKILA, N.; BARTH, M. Development and application of an international vehicle emissions model. **Transportation Research Record**, v. 1939, p. 155-165, 2005.
- DEC, J.E. **A conceptual model of DI Diesel combustion based on Laser-Sheet Imaging.** SAE paper 970873, 1997.
- DEGOBERT, P. **Automobiles and Pollution.** Warrendale: SAE International, 1995.
- DEPS – Division on Engineering and Physical Sciences. **Review of the 21st Century Truck Partnership**, Washington: National Academies Press, 2008. 130 p.
- DESANTES, J.M.; PAYRI, R.; SALVADOR, F.J.; GIL, A. Development and validation of a theoretical model for Diesel spray penetration. **Fuel**, v. 85, n. 7-8, p. 910-917, 2005.
- DIESELNET. **Emission Test Cycles.** Disponível em: <http://www.dieselnets.com/standards/cycles>. Acesso em 10 mai, 2011.
- \_\_\_\_\_. **Heavy-Duty Diesel truck and bus engines car and light trucks.** Disponível em <http://www.dieselnets.com>. Acesso em 01 ago. 2009.
- DI Cartography Center **Physical map of the world**, 802657AZ (R00349) 8-99, 1999.
- DIEMAND, D. **Automotive fuels at low temperatures.** U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. New Hampshire, Cold Regions Technical Digest, p. 91-92, 1991a.
- \_\_\_\_\_. **Automotive and construction equipment for Arctic use: Heating and cold starting.** U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. New Hampshire, Cold Regions Technical Digest, p. 91-93, 1991b.
- \_\_\_\_\_. **Automotive batteries at low temperatures.** U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. New Hampshire, Cold Regions Technical Digest, p. 91-94, 1991c.
- \_\_\_\_\_. **Lubricants at low temperatures.** U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. New Hampshire, Cold Regions Technical Digest, p. 90-91, 1990.
- DIEMAND, D.; LEVER, J.H. **Cold regions issues for off-road autonomous vehicles.** U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. New Hampshire, 2004.
- EEA – European Environment Agency. **COPERT 4 – Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport.** User manual (version 5.0), 2007.

- EL-GAMAL, I.M.; KHIDR, T.T.; GHUIBA, F.M. Nitrogen-based copolymers as wax dispersants for paraffinic gas oils. **Fuel**, v. 77, p. 375-385, 1998.
- EPA – Environmental Protection Agency. **Modeling and Inventories**. Disponível em: <http://www.epa.gov/otaq/mobile.htm>. Acesso em 5 mai, 2010.
- EUROPEAN COMISSION, 2008. **Road vehicles**. Disponível em: <http://ec.europa.eu/>. Acesso em 21 jun. 2009.
- FAIZ, A.; WEAVER, C.S.; WALSH, M.P. **Air pollution from motor vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions**. Washington, D.C.: The World Bank, 1996.
- FÄRNLUND, J.; ENGSTRÖM, C. **The representativeness of driving cycles in real world traffic**. Rototest AB publication 2001:35 E, 2001.
- FEAM. **Poluição Veicular**. Disponível em: [www.feam.gov.br](http://www.feam.gov.br). Acesso em: 18 ago. 2006.
- FLYNN, P.F.; DURRETT, R.P.; HUNTER, G.L.; LOYE, A.O.; AKINYEMI, O.C.; DEC, J.E.; WESTBROOK, C.K. **Diesel combustion: an integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics, and empirical validation**, SAE paper 1999-01-0509, 1999.
- FREMEL, T.V. Mechanism of action of pour-point depressants. **Chemistry and Technology of Fuels and Oils**, v. 29, p. 400, 1993.
- GABELE, P.; KARCHES, W.; RAY, W.; PERRY, N. **Emissions from a Light-Duty Diesel: Ambient Temperature and Fuel Effects**. SAE paper 860618, 1986.
- GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 202 p.
- GARDNER, T.P.; HENEIN, N.A. **Diesel starting: A mathematical model**. SAE technical report 880426, 1988.
- GIACOSA, D. **Motores Endotérmicos**. 3.ed. Barcelona: Editorial Científico-Médica, 1964.
- GONZALEZ, D.; BORMAN, G.L.; REITZ, R.D. **A study of Diesel cold starting using both cycle analysis and multidimensional calculations**. SAE paper 910180, 1991.
- GUIBET, J.-C. **Fuels and Engines**. Paris: Technip, 1999. 784 p.
- HAN, Z.P. **Diesel Engine Cold Start Combustion Instability and Control Strategy**. Ph.D Thesis, Mechanical Engineering Department, Wayne State University, 2000.

- HANSEN, M. **Proposição de um método para avaliação do adicional de emissões veiculares em partida a frio**. 2008. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2008.
- HANSEN, M.; ARIOTTI, P.; IMASATO, T.; CYBIS, H.B.B. Determinação do acréscimo de emissões devido à partida a frio para a estimativa de poluentes veiculares em áreas urbanas. **Anais do XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Rio de Janeiro, 2007.
- HARA, H.; ITOH, Y.; HENEIN, N. A.; BRYZIK, W. **Effect of cetane number with and without additive on cold startability and white smoke emissions in a Diesel engine**. SAE paper 1999-01-1476, 1999.
- HARDENBERG, H.O.; HASE, F.W. **an empirical formula for computing the pressure rise delay of a fuel from its cetane number from relevant parameters of Direct-Injection Diesel engines**. SAE paper 790493, 1979.
- HENEIN, N.A.; HAN, Z.P.; NITU, B.; BRYZIK, W. **Diesel engine cold start instability and control strategy**. SAE paper 2001-01-1237, 2001.
- HENEIN, N.A.; PATTERSON, D.J. **Emissions from Combustion Engines and their Control**. Ann Arbor Science Publishers Inc., 1972.
- HEYWOOD, J.B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988. 930p.
- HILL, D. **Fuelling Diesel engines with vegetable oil**. 2005.
- JOUMARD, R.; SÉRIÉ, E. **Modelling of cold start emissions for passenger cars**. MEET Project. INRETS report LTE 9931. 1999.
- JOUMARD, R.; VIDON, R.; PRUVOST, C.; TASSEL, P.; DE SOETE, G. Evolution des émissions de polluants des voitures particulières lors du départ à froid. **The Science of the Total Environment**, v. 169, p. 185-193, 1995.
- KEGL, B. Effects of BioDiesel on emissions of a bus Diesel engine. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 4, p. 863-873, 2008a.
- KEGL, B. BioDiesel usage at low temperature. **Fuel**, v. 87, n. 7, p. 1306-1317, 2008b.
- KEITH, O.; COLEY, T. **Automotive Fuels and Reference Book**. 2 ed. SAE International, 1995.

- KERN, C.; DRESSLER, W.; LINDEMANN, G.; ROTHACKER, V. **An Innovative Glow System for Modern Diesel Engines**. SAE paper 1999-01-1240, 1999.
- KHAIR, M.K.; JAASKELAINEN, H. **Combustion in Diesel Engines**, DieselNet Technology Guide, 2010.
- KNOTHE, G.; GERPEN, J.; KHOHL, J.; RAMOS, L.P. **Manual de BioDiesel**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 340 p.
- KOBAYASHI, A. T.; KURASHIMA, A.; ENDO, S. **Analysis of Cold Start Combustion in a Direct Injection Diesel Engine**. SAE paper 840106, 1984.
- KOBORI, S., KAMIMOTO, T.; ARADI, A.A. A study of ignition delay of Diesel fuel sprays. **International Journal of Engine Research**, v. 1, n. 1, p. 29-39, 2000.
- LABECKAS, G.; SLAVINSKAS, L. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection Diesel engine performance and exhaust emissions. **Energy Conversion and Management**, v. 47, p. 1954-1967, 2006.
- LA ROVERE, E.L.; MENDES, F.E.; SZWARCFITER, L.; MATTOS, L.B.R.; SZWARC, A. **Avaliação do PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores**. 2007. 170p. Documento elaborado para o programa Gestão da Qualidade do Ar nas Grandes Metrópoles Brasileiras – Ministério do Meio Ambiente, Rio de Janeiro, 2007.
- LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; GARCÍA-CONTRERAS, R. Stability of Diesel-bioethanol blends for use in Diesel engines. **Fuel**, v. 86, n. 10-11, p. 1351-1357, 2007.
- LAURIKKO, J. **Automotive Exhaust Emissions at Low Ambient Temperature**. SAE paper 890003, 1989.
- \_\_\_\_\_. Ambient Temperature and Fuel Effects on DI and IDI Diesel Cold Start Emission, XXIII Fisita Congress, Torino, May 1990, paper 905076, 1990.
- LEE, I.; JOHNSON, L.A.; HAMMOND, E.G. Reducing the crystallization temperature of BioDiesel by winterizing methyl soyate. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 73, p. 631-636, 1996.
- \_\_\_\_\_. Use of branched-chain esters to reduce the crystallization temperature of BioDiesel. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 72, p. 1155-1160, 1995.

- LINDL, B.; SCHMITZ, H.-G. **Cold Start equipment for Diesel direct injection engines**. SAE paper 1999-01-1244, 1999.
- LIU, H. **Simulation model for steady state and transient cold starting operation of Diesel engines**. ETD Collection for Wayne State University. Paper AAI3037106, 2001.
- LIU, H.; HENEIN, A.N.; BRYZIK, W. **Simulation of Diesel engines cold start**. SAE paper 2003-01-0080, 2003.
- LIU, H.; WANG, Z.; QIAP, S. **Improvement of engine cold start capability using supercapacitor and lead-acid battery hybrid**, Proceedings of the 23rd IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, p. 668-675, 2008.
- LLOYD, A.C.; CACKETTE, T.A. Diesel Engines: Environmental Impact and Control. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 51, p. 809-847, 2001.
- LOUREIRO, L.N. **Panorâmica sobre emissões atmosféricas estudo de caso: avaliação do inventário de emissões atmosféricas da região metropolitana do Rio de Janeiro para fontes móveis**. 2005. 153p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- MANN, N.; JOPPIG, P.; SOMMER, H.; SULZBACHER, W. **Fuel effects on the low temperature performance of two generations of Mercedes-Benz Heavy-Duty Diesel Engines**. SAE Paper 1999-01-3594, 1999.
- MEHTA, T.; KOTTAPALLI, A.; MAHMASSANI, H.S.; BHAT, C. **Assessing the environmental benefits of intelligent transportation systems: methodologies and applications**. CTR/University of Texas at Austin, research report 9/1/00-08/31/02, 2003.
- MENDES, F.E. **Avaliação de Programas de Controle de Poluição Atmosférica por Veículos Leves no Brasil**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- MITCHELL, K. **The cold performance of Diesel engines**. SAE paper 932768, 1993.
- MONTAZERI-GH, M.; NAGHIZADEH, M. Development of car drive cycle for simulation of emissions and fuel economy. **Proceedings 15th European Simulation Symposium**, Delft, 2003.
- MOREY, J.E.; LIMANOND, T.; NIEMEIER, D.A. Validity of chase car data used in developing emission cycles. **Journal of Transportation and Statistics**, v. 3, n. 2, p.15-28, 2000.
- NUNNEY, M.J. **Light and Heavy Vehicle Technology**, 4. ed., Butterworth-Heinemann, 2006.

- OBERT, E.F. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. Porto alegre: Globo, 1971. 618 p.
- ONURSAL, B.; GAUTAM, S.P. **Vehicular Air Pollution: Experiences from Seven Latin American Urban Centers**. World Bank Technical Paper, n. 373, 1997.
- OSUKA, I.; NISHIMURA, M.; TANAKA, Y.; MIYAKI, M. **Benefits of new fuel injection system technology on cold startability of Diesel engines – Improvement of cold startability and white smoke reduction by means of multi-injection with common rail fuel system (ECD-U2)**. SAE paper 940586, 1994.
- OTTOSSON, J. **Energy Management and Control of Electrical Drives in Hybrid Electrical Vehicles**. Licentiate Thesis – Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, Lund, 2007.
- PARENTE, E.J.S. **BioDiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza: Tecbio, 2003. 68 p.
- PASTOR, J.V.; GARCÍA-OLIVER, J.M.; PASTOR, J.M.; RAMÍREZ-HERNÁNDEZ, J.G. Experimental facility and methodology for systematic studies of cold startability in direct injection Diesel engines. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 9, p. 1-12, 2009.
- PAYRI, F.; BROATCH, A.; SERRANO, J.R.; RODRIGUEZ, L.F.; ESMORIS, A. **Study of the potential of intake air heating in automotive DI Diesel engines**. SAE paper 2006-01-1233, 2006.
- PHATAK, R.; NAKAMURA, T. **Cold startability of open-chamber direct-injection Diesel engines-Part I: Measurement techniques and compression ratio**. SAE paper 831335, 1983.
- \_\_\_\_\_. **Cold startability of open-chamber direct-injection Diesel engines-Part 2: Combustion chamber design and fuel spray geometry and additional air and glow plug as a starting aid**. SAE paper 831396, 1983.
- PETROBRÁS. **Produtos Petrobrás – Óleo Diesel**. 6. ed., Belo Horizonte, 2000. 79 p.
- RAKHA, H.; DING, Y. Impact of stops on vehicle fuel consumption and emissions. **Journal of Transportation Engineering**, v. 129, p. 23-32, 2003.
- RAKOPOULUS, C.D.; GIAKOUMIS, E.G. **Diesel engine transient operation**, London: Springer, 2009.

- RANDAZZO, M.L. **Emissões e performance de um veículo operando com misturas de BioDiesel e etanol**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- REASBECK, P.; SMITH, J.G. **Batteries for Automotive Use**. Somerset: Research Studies Press Ltd., 1997.
- ROUPHAIL, N.M.; FREY, H.C.; COLYAR, J.D.; UNAL, A. **Vehicle emissions and traffic measures: Exploratory analysis of field observations at signalized arterials**. 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C., 2000.
- ROADTRANSPORT, 2006. **The Euro exhaust emissions regulations**. Disponível em <<http://www.roadtransport.com>>. Acesso em 12 jul. 2009.
- SAE J814 – **Engine Coolants**, 1999.
- SAKURAI, H.; TOBIAS, H.J.; PARK, K.; ZARLING, D.; DOCHERTY, K.S.; KITTELSON, D.B.; MCMURRY, P.H.; ZIEMANN, P.J. On-line measurement of Diesel nanoparticle composition and volatility. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 1199-1210, 2003.
- SCHATZ, O. **Cold start improvement by use of latent heat stores**. SAE paper 921605, 1992.
- SHAH, S.D.; COCKER, D.R.; MILLER, J.W.; NORBECK, J.M. Emission rates of particulate matter and elemental and organic carbon from in-use Diesel engines. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 9, p. 2544-2550, 2004.
- SILVA, C.X.; ÁLVARES, D.R.S.; LUCAS, E.F. New additives for the pour point reduction of petroleum middle distillates. **Energy & Fuels**, v. 18, p. 599-604, 2004.
- STOUFFER, S.D.; LEWIS, A.B.; WHITNEY, T.J.; DRAKE, M.L. **Diesel engine cold start improvement using thermal management techniques**. Report UDR-TR-2000-00131, University of Dayton Research Institute, 2000. 130 p.
- STURM, P.J. *et al.* **Instantaneous emission data and their use in estimating passenger car emissions**. MEET Deliverable 6, COST 319 Final Report A2, Technical University Graz, 1998. 36 p.
- SUAREZ, P. **BIODIESEL no Brasil**. Disponível em: <<http://www.BioDieselbr.com/BioDiesel/brasil/BioDiesel-brasil.htm>>. Acesso em 21 jun. 2009.
- \_\_\_\_\_. **BIODIESEL no Mundo**. Disponível em: <<http://www.BioDieselbr.com/BioDiesel/mundo/BioDiesel-no-mundo.htm>>. Acesso em 21 jun. 2009.



- SUN, R.; SWEET, E.J.; ZURLO, J.R.; PFEFFERLE, W.C. **Diesel engine cold starting with catalytically ignited recirculated exhaust gas**. SAE paper 940086, 1994.
- TRL – Transport Research Laboratory. **Methodology for calculating transportation emission and energy consumption**. MEET Project Report SE/491/98. 1999.
- TSUNEMOTO, H.; YAMADA, T.; ISHITANI, H. **Behavior of adhering fuel on cold combustion chamber wall in direct injection Diesel engines**. SAE paper 861235, 1986.
- URNS, S.R. **An introduction to combustion: Concepts and applications**. New York: McGraw-Hill, 1996. 563 p.
- TZIRAKIS, E.; PITSAS, K.; ZANNIKOS, F.; STOURNAS, S. Vehicle emissions and driving cycles: comparison of the Athens Driving Cycle (ADC) with ece-15 and European Driving Cycle (EDC). **Global Nest Journal**. v. 8, n. 3, p. 282-290, 2006.
- UEDA, T.; ZHANG, L.; GABE, M. **Improvement of the cold startability of common rail injection system by pilot injection in a HD Diesel engine**. SAE paper 1999-08-0355, 1999.
- VAN BASSHUYSEN, R.; SCHAEFER, F. **Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems, and Perspectives**. Warrendale: SAE International, 2004. 868 p.
- VAN GERPEN, J. **Combustion in Diesel Engines-Modeling and Simulation**. SAE Engineering Academies Lecture Notes, 2001.
- \_\_\_\_\_. Conceitos básicos sobre motores Diesel e seus combustíveis. In: KNOTHE, G. (Org.) **Manual de BioDiesel**. São Paulo: E Blücher, 2006. p. 19-28.
- WEILENMANN, M.; SOLTIC, P.; SAXER, C.; FORSS, A.M.; HEEB, N. Regulated and nonregulated Diesel and gasoline cold start emissions at different temperatures. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 13. p. 2433-2441, 2005.
- WENZEL, T; SINGER, B.C.; SLOTT, R. Some issues in the statistical analysis of vehicle emissions. **Journal of Transportation and Statistics**, v. 3, p. 1-14, 2000.
- YASSINE, M.K. **Combustion Instability and White Smoke Emissions under Cold Starting of Diesel Engines**, Ph. D Thesis, Mechanical Engineering Department, Wayne State University, 1995.

ZHONG, L.R. **A Control Strategy for Cold Starting of a Diesel Engine With Common Rail Fuel Injection System**”, Ph. D Thesis, Mechanical Engineering Department, Wayne State University, 2006.

ZHONG, L.R.; LIU, H.Q.; HENEIN, N.A.; BRYZIK, W. **A Mathematical Model for the cranking Period in the Cold Start of Diesel Engines**. I MECE ASME International Mechanical Engineering Congress and R&RD Expo, Washington D.C., 2003.